საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გელ აშვილ ი გენად ი

ღრმა პურღვის საპურღი დანადგარების როტორული მაგიდის ელექტროამძრავის მართვის სისტემების კვლევა

> დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი დისერტაციის

> > ავტორეფერატი

თბილისი 2010 წელი სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის საინჟინრო კიბერნეტიკისა და ხელსაწყოთმშენებლობის დეპარტამენტის მართვის სისტემების და რობოტოტექნიკის მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სრული პროფ. გივი მაჩაბელი სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ასოც. პროფ. ნინო მჭედლიშვილი

რეცენზენტები: პროფ. ა. ედიბერიძე პროფ. ო. ლაბაძე

დაცვა შედგება ------ წლის "-----" ------, -----, ----- საათზე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VI, აუდიტორია 206 ბ. მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატისა - სტუ-ს ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი ------

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

სამუშაოს აქტუალურობა. ნავთობის ჭაბურღილის ბურღვის მსოფლიო პრაქტიკაში ტურბო ელექტრობურღვასთან შედარებით და უფროდაუფრო ფართო გავრცელებას ჰპოვებს როტორული ბურღვა. დროს მცირე სიღრმეებზე ბურღვის უფრო ეფექტურია პურღვა ჩაძირული ძრავის საშუალებით, რადგანაც ზედა ინტერვალებში გავლა ხორციელდება დიდი სიჩქარეებით, წინააღმდეგობის პატარა მომენტისას ბურღსატეხზე. ხოლო დიდ სიღრმეებზე, როდესაც საჭიროა ძრავას მომენტი ლილვზე დაბალ სიჩქარისას, ჩაძირული დიდი ძრავის გამოყენება არ არის მიზანშეწონილი მისი გაბარიტების მნიშვნელოვან გაზრდასთან დაკავშირებით ჭაბურღილის შემოსაზღვრული დიამეტრის გამო. ამიტომ, მიუხედავად დიდი დანაკარგებისა საბურღი მილების სვეტის კედლებზე პირველი სახის ბლანტი ხახუნის გამო, როტორული პურღვა გაცილებით უფრო საიმედო და ეფექტურია.

ელექტროძრავების სამუშაო პირობების შესწავლა, რომლებიც გამოიყენებიან როგორც ამძრავი საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდისათვის, შესაძლებლობას მოგვცემს შევაფასოთ როგორც თავად ელექტროძრავები, ისე მათი მართვის სქემის ღირსებები და ნაკლოვანებები.

საბურღი მილების მუშაობის საიმედობა განისაზღვრება დინამიკური დატვირთვებით, რომლებიც მათში წარმოიშვება სტაციონარული ბურღვის დროს და გარდამავალ პროცესებში. საბურღი მილების სვეტში (სმს) წარმოქმნილი მექანიკური ძაბვები განისაზღვრება

მრავალნაირი ფაქტორების დიდი რიცხვით, რომელთა შორისაც უნდა აღვნიშნოთ მგრეხი მომენტები. ასევე არსებობს პრობლემის კომპლექგადაწყვეტის აუცილებლობა, ვინაიდან ბურღვის პროცესი სური განისაზღვრება არა მარტო პურღსატეხის სანგრევზე დაწოლით, არამედ პრუნვის სიჩქარით, საბურღავ მილებში დაძაბულობით გაჭიმვისა და შეკუმშვის ძალვით, მგრეხი მომენტებით, ნორმალური და ტანგენციალური ძაბვებით. ეს საკითხები ტექნიკურ ლიტერატურაში საკმაოდ დაწვრილებითაა ასახული. სხვადასხვა ავტორებს მთელ რიგ შემთხვევებში განსხვავებული მონაცემები მოჰყავთ. ეს უპირველეს ყოვლისა ეხება ელექტროძრავის ლილვზე დატვირთვების განსაზღვრას. მოცემულ სამუშაოში განხილულია როტორული მაგიდის ძრავის ლილეზე დატვირთვების განსაზღერის ახალი მეთოდები და საბურღი ვიყენებთ მილების პარამეტრების ანალიზი, რასაც საბურღი ინსტრუმენტის მუშაობის რეჟიმების, სამართავად კვლევის და პროგრამის შესადგენად.

სამუშაოს მიზანი - მოცემული სამუშაოს ძირითად მიზანს წარმოადგენს საბურდი დანადგარების როტორული მაგიდის ელექტროამძრავის არსებული და ახლად დამუშავებული მართვის სისტემების დინამიური მაჩვენებლების შეფასება, რომლებსაც იყენებენ ღრმა და მეტად ღრმა ჭაბურდილის გასაბურდად, ბურდვის ინსტრუმენტისა და საბურდი მილების სვეტი (სმს-ს) მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმებში. მოცემული ამოცანა მეტად აქტუალურია, ვინაიდან დიდ სიღრმეებზე ნავთობის

მოწყობილობის საიმედო მუშაობა.

ამოცანები. სიღრმეებზე გამოკვლევის დიდ პურღვის საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდების ელექტროამძრავების გარდამავალი რეჟიმების გამოკვლევის ძირითად სირთულეს წარმოადგენს სისტემის მექანიკური ნაწილის სპეციფიკა. ტრადიციულად მიღებულია ელექტროამძრავის სისტემის განხილვა, როგორც სისტემისა თავმოყრილი პარამეტრებით. ზუსტად აქედან გამომდინარეობს ელექტროამძრავის შესწავლის კლასიკური თეორია. ნაშრომში განხილულ დანადგარებში მექანიკური ნაწილი - საბურღი მილების სვეტი (სმს), რომელიც არის ელექტროამძრავსა და სამუშაო თავაკს შორის დამაკავშირებელი რგოლი, წარმოადგენს განაწილებულ პარამეტრებიან სისტემას.

ამასთან დაკავშირებით, მოცემულ ნაშრომში მნიშვნელოვანი ყურადღება ეთმობა სმს-ს დინამიკის მათემატიკურ აღწერას. სისტემა "ელექტროამძრავი-სმს"-ის დინამიკური რეჟიმების სრულ გამოკვლევისათვის დისერტაციაში განიხილება შემდეგი საკითხები:

- სმს გამოკვლევის მეთოდი, როგორც სისტემა განაწილე ბული პარამეტრებით;
- განაწილებულ პარამეტრებიანი სისტემის მატემატიკური მოდელირება;
- "გენერატორ-ძრავას" და "სიხშირის გარდამსახ–ასინქრონული ძრავას" (Г-Д, ПЧ-АД) სისტემების მათემატიკური მოდელების გაანგარიშება და აგება. სინქრონული ძრავას ტრანსვექტორული მართვა (field oriented control (FOC)).

- ელექტროამძრავის ელექტრული, მექანიკური სიდიდეების
 და სმს განივკვეთებში გარდამავალ პროცესში მომენტების
 ცვლილების გამოკვლევა.
- საბურღი დანადგარების მუშაობის სხვადასხვა რეჟიმებში
 სმს ჭარბი ძაბვების და დაგრეხის კუთხეების ანალიზი.

გამოკვლევის მეთოდები. სამუშაოს შესრულებისას გამოვიყენებთ: სასრული სხვაობების მეთოდს, ანალოგიების მეთოდს, ელექტრომექანიკური ანალოგიის მეთოდს, სმს გრეხითი რხევების გამოკვლევები ბურღსატეხზე წინააღმდეგობის მომენტის ნახტომისებური ზრდის დროს, საბურღი მილების ბრუნვის რხევების დროს დაძაბულობების განსაზღვრას და იმიტირებული მოდელირების მეთოდს Matlab/Simulink სისტემაში.

დასკვნებისა და რეკომენდაციების საფუძვლიანობა და სარწმუნოება მტკიცდება მათემატიკური მოდელებისა და მეთოდების გამოყენებით, რომელთა რეალური პროცესებისადმი ადექვატურობა მტკიცდება გამოკვლევების შედეგებით; თეორიულად მიღებული შედეგების თანხვედრით ლაბორატორიული გამოკვლევების შედეგებთან. კვლევის პროცესში ვიყენებდით თანამედროვე აღჭურვილობას, და ვახდენთ საკვლევი პროცესების კომპიუტერულ მოდელირებას.

ლაბორატორიული გამოკვლევების შედეგები, ამტკიცებენ შემოთავაზებული მოდელების, ტექნიკური გადაწყვეტილებებისა და დასკვნების სისწორეს.

სამუშაოს სამეცნიერო სიახლე:

- საბურღი მოწყობილობის როტორული მაგიდისათვის ელექტროამძრავის სიჩქარის ტრანსვექტორული მართვის გამოყენება;
- საბურღი მილების სვეტის მათემატიკური მოდელების აგება
 და ანგარიში მოდელირების კომპიუტერული პროგრამების
 Matlab/Simulink გამოყენებით;
- "ელექტროამძრავის-სმს" სისტემის მუშაობის ანალიზისთვის საბურღი მილების სვეტის ქცევის გრაფიკული ასახვა Simulink-ში.

პუბლიკაციები. დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 5 სტატია GEN საერთაშორისო ჟურნალში, გაკეთებულია მოხსენება კონფერენციაზე თემაზე "საბურღი მილების სვეტის გრეხითი ავტორხევების გამოკვლევა კომპიუტერული სისტემის Matlab-ის გამოყენებით". სტუ, საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის "ინფორმაციული ტექნოლოგიები 2008" მოხსენებათა კრებული, თბილისი, 2008, 186-190.

სამუშაოს მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალისაგან, სამი თავისაგან, დანართებისაგან და შეიცავს 161 გვერდს, 35 სურათს, 7 ტაბულას ლიტერატურის სიას 32 დასახელებით.

სამუშაოს ძირითადი შინაარსი

შესავალში განხილულია პრობლემის არსი, დასაბუთებულია მისი აქტუალობა, ფორმულირებულია მიზანი და სამუშაოს ძირითადი ამოცანები.

პირველ თავში გამოკვლეულია საბურღი დანადგარის როტორული მაგიდის ელექტროამძრავების შემდეგი სისტემები:

- ასინქრონული ძრავა მოკლედშეკრული როტორით; სისტემა სიხშირის გარდამსახი-ასინქრონული ძრავა (ПЧ-АД);
- გენერატორი-ძრავას სისტემა (Г-Д):
- ცვლადი დენის ძრავას ტრანსვექტორული მართვის სისტემა.

ელექტროამპრავი Г-Д სისტემაში გენერატორის ტირისტორული აგზნებით. მოცემულ საბურღ დანადგარში გამოიყენება მუდმივი დენის ამძრავი. ეს აიხსნება ელექტროამძრავის გაცილებით მაღალი საიმედობით და გამძლეობით დიზელურთან შედარებით, ასევე ელექტროამპრავის მნიშვნელოვნად უკეთესი მახასიათებლებით (უფრო მაღალი მ.ქ.კ. გადატვირთუნარით, იოლი მონტაჟისა და და დემონტაჟით, კინემატიკური სქემების სიმარტივით, ექსპლუატაციის უფრო დაბალი ღირებულებით, საწვავის საბურღზე მიწოდების აუცილებლობის არარსებობით).

განვიხილოთ ელექტროამძრავი Г-Д სისტემაში გენერატორის ტირისტორული აგღზნებით, რომელიც ფართოდ გამოყენება წარმოების მრავალ სფეროში. საკმარისია ვთქვათ, რომ სხვადასხვა დანიშნულების მუდმივი დენის მძლავრი ელექტროამძრავების უმრავლესობა Г-Д სისტემით არის შესრულებული. ეს აიხსნება მთელ რიგ სხვა ამძრავებთან შედარებით მისი მნიშვნელოვანი უპირატესობებით:

- მექანიკური მახასიათებლების მაღალი სიხისტე;
- სიჩქარის რეგულირების დიდი დიაპაზონი და სიმდოვრე;
- გამშვები წინააღმდეგობების და მათში ენერგიის დანაკარგების
 არარსებობა;
- ძრავას რევერსის სიმარტივე ღუზის წრედში გადართვების გარეშე;
- ამძრავის დამუხრუჭება ქსელში ენერგიის რეკუპერაციით;
- ამძრავის მართვის სისტემის სქემური გადწყვეტის შედარებითი
 სიმარტივე, რომელიც არ მოითხოვს მომსახურე პერსონალის
 მაღალ კვალიფიკაციას.

აღნიშნულ ღირსებებთან ერთად Г-Д სისტემა არ არის მოკლებული მნიშვნელოვან ნაკლსაც, რომელთა შორის უნდა აღინიშნოს:

- ამძრავის არასაკმარისი სწრაფქმედება;
- დაბალი სიჩქარეების ზონაში ძრავას არამდგრადი მუშაობა,
 რომელიც ზღუდავს რეგულირების დიაპაზონს;
- მარგი ქმედების დაბალი კოეფიციენტი, რომელიც არ აღემატება
 75-80%;
- მაღალი დადგენილი სიმძლავრე, რომელიც რეგულირებადი ძრავას სამჯერადი სიმძლავრის ტოლია;
- დიდი დაკავებული ფართობი.

ამმრავის სტრუქტურული სქემის შედგენა და მისი პარამეტრების გაანგარიშება.

ნახ.1-ზე წარმოდგენილია ელექტროამძრავის სტრუქტურული სქემა Г-Д სისტემით გენერატორის ტირისტორული აგღზნებით. ძრავა წარმოდგენილია რხევადი რგოლის სახით, ხოლო გენერატორი და ტირისტორული გარდამქმნელი წარმოდგენილია აპერიოდული რგოლების სახით.



სურ.1. ელექტროამძრავის სტრუქტურული სქემა Г-Д სისტემით.

ПЧ-АД სისტემის ელექტროამძრავის პრინციპიალური და

სტრუქტურული სქემები.



სურ.2.





პირველ რიგში გაანგარიშებული იყო გახსნილი სისტემის სტატიკური მახასიათებლები. სიჩქარის საზომ მექანიკური გარდამსახად და გამოყენებულია ტაქოგენერატორი, დენის საზომ გარდამსახად - შუნტი. დაქვემდებარებული რეგულირების სისტემის გაანგარიშება ჩატარებული იყო მოცემულობებთან ახლოს მდგომი მაჩვენებლების უზრუნველსაგამოიყენება მასშტაბის Tμ. ამისათვის კოეფიციენტი ყოფად. შედგება დაქვემდებარებული რეგულირების სისტემა დენისა და სიჩქარის რეგულატორებისაგან.

სისტემაში დენის შეზღუდვისათვის გამოიყენება ინტენსივობის მავალებელი სიგნალის მატებით 0.22წ. დაქვემდებარებული რეგულირების სისტემის მოდელირებისას მიღებული იყო შემდეგი შედეგები: დენი და სიჩქარე ნომინალური მნიშვნელობას აღწევს ისე რომ, გამშვები დენი არ აღემატება მაქსიმალურ დასაშვებ სიდიდეს, რეგულირების დრო პრაქტიკულად ემთხვევა მოცემულს.

Г-Д სისტემის ელექტროამძრავთან შედარებით, ელექტროამძრავი

სიხშირის რეგულირებით ხასიათდება შემდეგი უპირატესობებით:

- ელექტროაღჭურვილობის მასის და გაბარიტების შემცირება;
- ელექტროძრავის ნაკლებად ფეთქებადსაშიშროება.;
- სიჩქარის რეგულირების მაღალი სიზუსტე;
- მომენტის პირდაპირი მართვის ხარჯზე მიიღება ელექტროამ ძრავის დინამიურ რეჟიმებში ფუნქციონირების ხარისხის
 სასურველი მაჩვენებლები;
- სმს-ში და გადამცემ მექანიზმში დინამიკური დატვირთვების შემცირება, რადგანაც ასინქრონული მოკლედ ჩართული ძრავის როტორის ინერციულობა გაცილებით ნაკლებია მუდმივი დენის ძრავის როტორის ინერციაზე;
- უფრო მარტივია ავტომატიკის ლოკალური სისტემების შერწყმა
 ზედა დონის მართვის სისტემასთან;
- მეტია ექსპლუატაციის მძიმე პირობებში მომუშავე ელექტროამ პრავის საიმედობა და ხანგრძლივობა;
- დიაგნოსტიკის ჩაშენებული სისტემის წყალობით მცირდება
 დანახარჯები ტექნიკურ მომსახურეობაზე და ტექნოლოგიური
 აღჭურვილობის უქმად ყოფნის დრო და სხვ.

ელექტროამძრავი ტრანსვექტორული მართვის АД სისტემით

სამფაზიანი АД (სურ.4) იკვებება სიხშირის (დანართი1). გარდამქმნელიდან, რომელიც ძაბვის წყაროს თვისებებით ხასიათდება. ძრავას სამუშაო ნაპრალში მოთავსებულია პოლის საზომი გარდამსახები, რომელთა საშუალებითაც იზომება ძირითადი მაგნიტური ნაკადის ორთოგონალური შემადგენელები ψ_{mα} და ψ_{mβ}. სტატორის ორ ფაზაში დაყენებულია დენის საზომი გარდამსახები, რომელთა სიგნალებიც i_{1a} i_{1b} შემდეგ გარდაიქმნება (3/2) სტატორის დენის (დანართი 2). ვექტორის ორთოგონალურ პროექციებად კოორდინატთა უძრავ სისტემაში i^(αβ).

სტატორის დენის ვექტორების i^(αβ) მიღებული პროექციებისა და ნაპრალში ნაკადშებმის ψ^(αβ) საშუალებით ნაკადის გარდაქმნის ბლოკში (ΠΠ) (სურ.6.) იანგარიშება როტორის ნაკადშებმა კოორდინატების უძრავ სისტემაში შემდეგ გამოსახულების შესაბამისად:

$$\psi_{2}^{(\alpha\beta)} = \psi_{m}^{(\alpha\beta)} \frac{L_{2}}{L_{m}} - t_{1}^{(\alpha\beta)} L_{1\sigma} \rightarrow \psi_{2m} = \psi_{mn} \frac{L_{2}}{L_{m}} - t_{1\alpha} L_{1\sigma}; \ \psi_{2\beta} = \psi_{m\beta} \frac{L_{2}}{L_{m}} - t_{1\beta} L_{1\sigma}$$

შემდეგ ე.წ. ვექტორ-ფილტრის საშუალებით (ვფ) (სურ.5) იანგარიშება

როტორის ნაკადშებმის მოდული $|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2x}^2 + \psi_{2\beta}^2}$ და არგუმენტი ფუნქციები, რომელიც განსაზღვრავს კოორდინატთა სინქრონული სისტემის მიმდინარე მდგომარეობას სივრცეში

$cos\theta_1 = \psi_{2\alpha}/\psi_2; sin = \psi_{2\beta}/\psi_2.$

პრუნვის სიხშირის შესახებ ინფორმაცია შემოდის სიჩქარის გადამწოდის გამოსასვლელიდან (ДС) (სურ.8.). კოორდინატების გახსნის ბლოკი (БР) (სურ.7) შეიძლება ავაგოთ АД მოდელის განტოლებათა საფუძველზე, რომელსაც ექნება ასეთი სახე:

$$u_{1d} = u_{d0}^* r_1 \left(1 + T_1' p \right) - u_{q0}^* \omega L_1'$$
$$u_{1d} = u_{d0}^* r_1 \left(1 + T_1' p \right) + u_{q0}^* \omega L_1' + \omega |\psi_2| k_2$$

მეორე თავი იწყება სმს მოდელის აგების პრინციპის გამომუშავებით. მთელი რიგი საბურღი მექანიზმებისა ხასიათდება საკმაოთ გრძელი არსებობით, ტრანსმისიებით, საბაგიროებით სხვა ლილვების და მოწყობილობებით, რომელთა საშუალებითაც გადაეცემა ძალვები დინამიური სამუშაო ორგანოებს. ელექტროამძრავის რეჟიმების ასეთი მოწყობილობების წარმოდგენამ ანალიზისას თავმოყრილი პარამეტრების მქონე სისტემის შეიძლება მნიშვნელოვნად სახით დაამახინჯოს ფიზიკური პროცესების რეალური სურათი. მოცემულ სამუშაოში განიხილება საბურღი დანადგარის როტორული მოწყობილობის ელექტროამპრავში გარდამავალი პროცესების ანალიზის ისეთი მეთოდი, სადაც ობიექტი განაწილებული პარამეტრებითაა. როტორულ მაგიდას მოძრაობაში მოპყავს საბურღი მილების სვეტი, რომლის საშუალებითაც მბრუნავი მომენტი გადაეცემა სამუშაო ორგანოს ბურღსატეხს, რომელიც ახორციელებს ქანების ბურღვას. თანამედროვე საბურღ მოწყობილობებში სვეტის სიგრძე შეიძლება იყოს რამოდენიმე კილომეტრი. ცხადია, რომ მითითებულ პირობებში სავსებით დაუშვებელია იგნორირება გავუკეთოდ სვეტის გასწვრივ მომენტების და სიჩქარის გავრცელების პროცესს.

არსებული საბურდი მილებისათვის მბრუნავი რხევების გავრცელების სიჩქარე სვეტის გასწვრივ შეადგენს 3300მ/ს. ე.ი. სვეტის გასწვრივ გავრცელების დრო შეიძლება აღემატებოდეს 1-2წმ. განსახილველი სისტემის დინამიკის ანალიზი შესრულებულია ანალოგიის მეთოდის საშუალებით, რომელიც საბურღი მილების სვეტს

წარმოადგენს მკვრივი ერთგვაროვანი ღერძის სახით ინერციის მომენტების და წინააღმდეგობების მუდმივი მნიშვნელობებით ნებისმიერ განივკვეთში. ამას გარდა, დაიშვება, რომ ჭაბურდილში საბურდი სვეტის ბრუნვის დროს ადგილი აქვს მხოლოდ პირველი რიგის ბლანტ ხახუნს. მაშინ სვეტის ერთეული სიგრძის ელემენტი შეიძლება დახასიათებული იქნას ინერციის მომენტის J_0 , ბლანტი ხახუნის კოეფიციენტით და დამყოლობის (ან სიხისტის c_0) კოეფიციენტით შესაბა h_0 e_0



სურ.9. სმს-ის გათვლის პრინციპიალური სქემა.

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

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

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

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

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

$$\frac{d \omega_{A}}{d \tau} = \alpha_{n} \left(\overline{M}_{n} - \overline{M}_{A} \right) - \beta_{n} \overline{\omega}_{A}$$
(2)

აქ არის იმ უპნების რაოდენობა, რომლებლებზეც იყოფა საბურდი *n* მილების სვეტი მოდელირებისას. (2) განტოლებათა სისტემის ამოხსნისათვის გამოიყენება ორი ხერხი. ერთი მდგომარეობს ვიზუალური დაპროგრამების სისტემის Simulink-ის გამოყენებაში, მეორე - სისტემა Matlab-ში მოდელირებით. შევადგინოთ საბურდი სვეტის მოდელი Simulink-ის ბლოკების საშუალებით, რომელიც საშუალებას იძლევა სხვადასხვა რიცხვისთვის ჩატარებული იქნას დინამიკის ანალიზი.



ნახ.10. საბურღი სვეტის მოდელის ბლოკ-სქემა, როცა $M_{_{dos}}=426,9$

n = 4



მოდელირების შედეგები მოყვანილია შემდეგ ნახაზზე:

ნახ.11 დამოკიდებულება $\omega_i(t)$

მოდელის სტრუქტურა შესაძლებლობას გვაძლევს ოსცილოსკოპზე დავინახოთ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა, ამასთან შეიძლება ვნახოთ როგორც საბოლოო სიდიდეები: ω_δ და Μ_n, ასევე შუალედური ω_l (i=1,...,n-1). ჩატარებული იქნა ექსპერიმენტები M_{лв}, M_д და n სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის.

ელექტრომექანიკური ანალოგიის მეთოდი. განვიხილოთ გრძელი ორსადენიანი ხაზის განტოლება, რომელიც წარმოდგენილია თანაბრად განაწილებული დანაკარგების, ინდუქტიურობის, წინააღმდეგობების და ტევადობების სისტემით. U პოტენციალთა და I დენის ძალთა სხვაობა განისაზღვრება \mathbf{x} + $\Delta \mathbf{x}$ განაკვეთებში კირხპოფის კანონის х და საფუძველზე ჩაწერილი პროცესისათვის, რომელიც ხორციელდება Δχ მონაკვეთში დროის Δt შუალედში. U(x,t)-U(x+ Δx ,t) სხვაობა განსაზღვრავს პოტენციალთა სხვაოპას ინდუქტიურობებზე ომურ და

წინაღობებზე:

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

სადაც L და R - შესაპამისად სიგრძის ერთეულზე ინდუქტიურობა და ომური წინაღოპაა.

მარჯვენა ნაწილის პირველი წევრი, რომელიც ახასიათებს ე.მ.ძ. ცვლილებებს ინდუქტიურობებზე, განისაზრვრება დენის ძალის ცვლილებით დროში. მეორე წევრი - პოტენციალების ცვლილებაა, რომელიც გამოითვლება ომის კანონით.

მეორე განტოლება - დენის ძალის ბალანსია, რომელიც განისაზღვრება ტევადური დანაკარგებით,

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

სადაც C - ტევადობაა სიგრძის ერთეულზე, G - გადინება სიგრძის ერთეულზე.

მარჯვენა ნაწილის პირველი წევრი - დენის ძალაა, რომელიც გაივლის კონდენსატორში და ხასიათდება პოტენციალების სხვაობით დროში. მეორე წევრი – გადინება, რომელიც ომის კანონით განისაზღვრება. გავყოთ და და ვიპოვო ზღვარი, როცა და . $\Delta x \to 0$ $\Delta t \to 0$ მივიღებთ შემდეგ განტოლებებს:

$$-\frac{\partial U}{\partial X} = L\frac{\partial l}{\partial t} + Rl$$

$$-\partial \frac{\partial l}{\partial x} = C\frac{\partial U}{\partial t} + GU$$
(3)

განტოლებების სისტემა (3) შეიძლება დაყვანილი იქნას ერთ

განტოლებამდე, რისთვისაც პირველი განტოლება დიფერენცირდება დროით, ხოლო მეორე x და ედრება ერთმანეთს ერთნაირი <u>მ²U</u> *дx∂t* წევრები. რთული არ არის დავრწმუნდეთ, რომ როდესაც G=0, (3) სისტემა დაიყვანება ჰიპერბოლური ტიპის დიფერენციალურ განტოლებამდე:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = \frac{1}{LC} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - \frac{R}{L} \frac{\partial I}{\partial t}$$
(4)

რომელიც ანალოგიურია განტოლებისა

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - 2h \frac{\partial u}{\partial t}$$
(5)

სადაც

$$a^2 = \frac{1}{LC}; 2h = \frac{R}{L}; u = I$$

ეს განტოლება ფორმალურად ანალოგიურია საბურღი მილების სვეტის მოძრაობის განტოლებისა წინაღობით გარემოში, რომელიც პროპორციულია სვეტის მოძრაობის პირველი ხარისხის სიჩქარისა. (5) განტოლების ამოხსნის ერთ–ერთ გავრცელებულ მეთოდს წარმოადგენს ელექტრომექანიკური ანალოგიის მეთოდი, რომელიც გვაძლევს ამოხსნის შესაძლებლობას ბუნებით ორი განსხვავებული მოვლენის დიფერენციალურ განტოლებებს შორის არსებული ფორმალური მსგავსების საფუძველზე.

სასრული სხვაობების მეთოდი. დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნის ერთ–ერთ მიახლოებით მეთოდს წარმოადგენს სასრული სხვაობების მეთოდი. მეთოდის მირითადი იდეა მდგომარეობს იმაში, რომ მთლიანი სხეული ან გარემო განიხილება, როგორც დიდი რაოდენობის ელემენტარული ნაწილების ერთობლიობა. სასრული–სხვაობითი მიახლოებით განაწილებულ პარამეტრებიანი სისტემა შეიძლება შევცვალოთ დისკრეტული ელემენტების ერთობლიობით ისე, რომ საწყისი სისტემის მახასიათებლები დაახლოებით უცვლელი დარჩეს.

ამგვარად, დიფერენციალური განტოლება კერძო წარმოებულებში შეიძლება დავიყვანოთ ალგებრული განტოლებების სისტემამდე. ასეთი მიდგომა გამოიყენება მათემატიკური ფიზიკის ფართო კლასის ამოცანების გადასაწყვეტად კომპიუტერების საშუალებით.

ამრიგად, სასრული სხვაობების მეთოდი საშუალებს გვაძლევს კერძო წარმოებულების განტოლებიდან გადავიდეთ ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებების სისტემაზე.



ნახ. 12. დისკრეტული რგოლი, საბურღი მილების სვეტის ანალოგი.

ასევე ჩატარებულია სმს გრეხვის რხევების გამოკვლევა წინაღობის მომენტის ნახტომისებური ზრდის დროს სატეხზე. საბურღი მილების კუთხური სიჩქარით და სატეხზე სვეტი ბრუნავს მუდმივი ω_0 ღერძული დატვირთვის გაზრდისას ხდება სანგრევზე მომენტის სიდიდით. სვეტი განიხილება როგორც ნახტომისებური ზრდა ΔM ვერტიკალური ლილვი სიგრძეზე განაწილებული მასით. კოორდინატემოთავსებულია ჭაბურღილის სათავეში, ღერმი ზის სათავე OX მიმართულია ქვევით. სვეტის ინერციის მომენტი სიგრძის ერთეულზე აღნიშნულია I, ხოლო ხახუნის მომენტი სვეტის სიგრძის ერთეულზე Bw, სვეტის ნაწილის სიგრძე Δx , და x და $x+\Delta x$ განივკვეთებში მბრუნავი მომენტები შესაბამისად M(x) $M(x+\Delta x)$ ტოლია, შესაბამის განტოლებას აქვს სახე:

$$I\frac{\partial\omega}{\partial t}\Delta x = M(x) - M(x + \Delta x) - B\omega\Delta x$$
(6)

ჰუკის კანონით მბრუნავ მომენტს და ღერძის პრუნვის კუთხეს შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება:

$$M = -J_0 G \frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{7}$$

სადაც G – არის ძვრის მოდული: J₀ - მილების განივი განაკვეთის პოლარული ინერციის მომენტი. **პაბვის განსაზღვრა საბურღი მილების საგრეხი რხევების დროს**. მილების სვეტის მბრუნავი მოძრაობის გამოსაკვლევად მიღებულია სქემა:



სურ.13

სადაც 1 – როტორის მბრუნავი ელემენტები ინერციის დაყვანილი მომენტით I₁, რომლებზედაც მოქმედებს ბრუნვის დაყვანილი მომენტი M_1 : 2 - საბურღი მილების სვეტი ინერციის მომენტით სიგრძის ერთეულზე I: მილის განივკვეთის ინერციის პოლარული მომენტი J₀, მილების მასალების ძვრის მოღული G; 3 – სვეტის დამძიმებული ბოლო ინერციის მომენტით I₂, რომელზედაც ქანების მხრიდან მოქმედებს წინააღმდეგობის მომენტი M₂.



სურ.14 დამოკიდებულება (x;t) სხვადასხვა x-ის დროს (სმს-ის მბრუნავი რხევების დამაბულობის გრაფიკი სვეტის სხვადასხვა განივკვეთებში).

პრაქტიკული თვალსაზრისით ინტერესს წარმოადგენს მილების სვეტის დაძაბული მდგომარეობის შესაბამისი განტოლება გარდამავალი რეჟიმის დამთავრებიდან დიდი დროის შემდეგ. ვსარგებლობთ რა თეორემით განსაზღვრულ მნიშვნელობების შესახებ, ვიღებთ გამოსახულებას, რომელიც აღწერს საბურდი მილების სვეტის დაძაბულ მდგომარეობას როტორის ბრუნვის დიდი ხანგრძლივობის დროს გარდამავალი რეჟიმის დამთავრების შემდეგ, როდესაც M₁=const, M₂=0, I₂=0:

$$\tau(x,\infty) = \frac{M_1 R\left(1 - \frac{x}{l}\right)}{J_0(1+\beta)}; \quad \beta = \frac{I_1}{I_0}; \quad I_0 = I_l.$$

მიღებული გამოსახულებებიდან შეიძლება გავაკეთოთ მთელი რიგი შესაბამისი დასკვნები. მაგალითად, მბრუნავი მასების ინერციის მომენტის გაზრდასთან ერთად იზრდება , რაც იწვევს შემცირებას. ${\scriptstyle {\cal B}}$ au საბურღი მილების სვეტის ინერციის მომენტის გაზრდასთან ერთად, ე.ი.

შემცირებასთან ერთად, დამაბულობა შესაბამისად იზრდება. β შევნიშნოთ ასევე როგორ ხდება რხევების მილევა თიხის ხსნარისა და საბურღი მილების სვეტს შორის ხახუნის შედეგად.

მესამე თავში ელექტროამმრავის თითოეული სისტემა გამოკვლეული იყო საბურღი დანადგარის მუშაობის შემდეგ რეჟიმებისას:

- სვეტის უქმი სვლა (სანგრევზე აღმართული ბურღსატეხის დროს);
- დატვირთვის გადასროლა ბურღსატეხზე;
- დატვირთვის ჩამოყრა (ბურღსატეხის მოწყვეტა სანგრევიდან);
- პულსირებადი დატვირთვის დადებისას პურღსატეხზე;
- სვეტის მიტაცება (სვეტის დამუხრუჭება ჭაბურღილში გრუნტის ჩამოყრის შედეგად);
- ბურღსატეხის მიტაცება (ბურღსატეხის სრული შეჩერება გრუნტის წინააღმდეგობის მომენტის ზემოქნმედებით).

შევადგინოთ სისტემა Simulink-ში ბლოკ–სქემა, რომელიც სმს–ს აკავშირებს სისტემა ПЧ-АД ძრავთან. სქემა საშუალებას გვაძლევს გრაფიკულად განვიხილოთ სვეტისა და ძრავას მოქმედება 5000მ ბურღვისას.

სისტემა "ელექტროამძრავი–სმს" გაშვების რეჟიმის ანალიზი. მოდელში გაშვების მომენტის გამოკვლევისას გამოიყენებოდა საწყისი და სასაზღვრე პირობები. ელექტროამმრავის მოდელის გაშვების პროცესი სმს–თან ერთად ხორციელდება მაბვის მიწოდების გზით ელექტროამმრავის მოდელში გამამლიერებლების შესაბამის შესასვლელებზე.

ასინქრონული ძრავისათვის ხდებოდა დაკვირვება შემდეგ სიდიდეებზე:

M_{дв}(t), ω_{дв}(t) – მომენტი და სიჩქარე ძრავას ლილვზე ან მომენტი და სიჩქარე სმს ზედა განაკვეთში.

სმს–სთვის ჩაიწერა შემდეგი სიდიდეები:

 $\phi(t)$ – სვეტის დახვევის კუთხე;

 $\omega_{10}(t)$ – სვეტის ბრუნვის სიჩქარე;



ნახ.15.

M₁(t) ÷ M₁₀(t) - მომენტების დროზე დამოკიდებულება თითოეული უბნის შუაში, რომელზედაც დაყოფილია სმს მოდელირების დროს. (უბნის ნუმერაცია და მომენტის შესაბამისი ინდექსები იზრდება ჭაბურღილის სათავიდან ბურღსატეხისაკენ).

ელექტროამმრავის სისტემის უქმად სვლის გარდამავალი პროცესების გრაფიკი, სანგრევზე აწეული ბურღსატეხის დროს, ნაჩვეენებია სურ.16. სისტემაში არის უარყოფითი უკუკავშირი სიჩქარის მიხედვით, რაც საშუალებას გვაძლევს გარკვეულ დონით დავასტაბილუროთ მთელი სმს ბრუნვის სიჩქარე, სტატიკური დატვირთვის შეცვლის დროს.

როგორც გრაფიკიდან ჩანს, სვეტის დაძვრასთან ერთად, დატვირთვის მომენტი მდორედ იზრდება. დახვევის კუთხეც მდორედ იცვლება და მისი დამყარებული მნიშვნელობა შეადგენს 0,208фдон. სმს უქმი ბრუნვისას მრავას ლილვზე მომენტი შეადგენს - 0,76М_н.

სმს მომენტების და სიჩქარის რხევები მით მეტია, რაც უფრო მეტია ძრავას სიჩქარის წარმოებული ამძრავის გაშვების საწყის მომენტში. სმს დაგრეხის კუთხე არ აღემატება დასაშვებ საზღვრებს. ძრავას მუშაობა მარეგულირებელ მახასიათებლებზე საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ ძრავას ლილვზე უქმი სვლის მომენტების უფრო თანაბარი განაწილება.

ელექტროამძრავების განხილული სისტემების დინამიკური თვისებების შედარებით ანალიზმა საშუალება მოგვცა ჩამოვაყალიბოთ რეკომენდაციები ცვლადი და მუდმივი დენის მრავალსიჩქარიანი ძრავების სისტემების განვითარების მიზანშეწონილობის შესახებ.



რეზიუმე

დიდი სიღრმის ჭაბურღილების ბურღვისას საჭიროა მრავას ლილვზე მცირე სიჩქარისას დიდი მომენტის არსებობა. პირველი რიგის სვეტის ჭაბურღილის კედლებზე ბლანტი ხახუნის დროს დიდი ბურღვის დანაკარგების მიუხედავად, როტორული საშუალება გაცილებით ეფექტური საიმედოა. ამ გარემოების გარდა, და ჭაბურღილის გამრუდების ალბათობა როტორული ბურღვის დროს გაცილებით უფრო პატარაა.

საბურღი სისტემის მუშაობის სპეციფიურობა ბევრად აძნელებს ყველა მექანიკური ზემოქმედების სწორ შეფასებას, რომლებიც

მოქმედებენ მიმყოლ როტორული მაგიდის ელექტროძრავაზე. ელექტრომრავების მუშაობის პირობების შესწავლა, რომლებიც ამმრავად გამოიყენება საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდებისათვის, საშუალებას გვაძლევს ხარისხობრივად შევაფასოთ როგორც თავად მისი სქემის ღირსებები ელექტრომრავის, ასევე მართვის და ნაკლოვანებები. ამიტომ დენის სახის, ძრავის ტიპის, მისი მართვის სქემის სისწორე ბევრად არის დამოკიდებული რეჟიმზე, რომელშიც მუშაობა უხდება საბურღ მოწყობილობას.

მოცემულ დისერტაციაში გამოკვლეულია საბურღი დანადგარის როტორული მაგიდის ელექტროამძრავის შემდეგი სისტემები:

- ასინქრონული ძრავა მოკლედშეკრული როტორით სისტემა
 სიხშირის გარდამსახი ასინქრონული ძრავა (ПЧ-АД)
- გენერატორი-ძრავის სისტემა (Г-Д) მუდმივი დენის-ამძრავი;
- ცვლადი დენის ამძრავით ტრანსვექტორული მართვის სისტემა.
 ჩატარებული იყო აგრეთვე შემდეგი ანალიზები:
- სმს-ის გრეხითი ავტორხევების ანალიზი, როღესაც სისტემაში წარმოიშვება არამილევადი პერიოდული რხავები, გამოწვეული არა გარე ზემოქმედებით, არამედ თვით სისტემის პარამეტრებით;
- სმს სასრული სხვაობების მეთოდით და ანალოგიის მეთოდით
 საგრეხი რხევების შესწავლა;;
- ელექტრომექანიკური ანალოგიის მეთოდი;

- სმს საგრეხი რხევების შესწავლა ბურღსატეხზე წინაღობვის
 მომენტის ნახტომისებური ზრდისას;
- ძაბვების განსაზღვრა საბურღი მილების საგრეხი რხევების დროს;

ელექტროამპრავის თითოეული სისტემა გამოკვლეულია საბურღი დანადგარების მუშაობის შემდეგი რეჟიმების დროს:

- სვეტის უქმად სვლისას (სანგრევზე აღმართული პურღსატეხის დროს);
- დატვირთვის გადასროლა პურღსატეხზე;
- დატვირთვის ჩამოყრა (ბურღსატეხის მოწყვეტა სანგრევიდან);
- ბურღსატეხზე პულსირებადი დატვირთვის დადებისას;
- სვეტის მიტაცება (სვეტის დამუხრუჭება ჭაბურღილში გრუნტის ჩამოყრის შედეგად);
- ბურღსატეხის მიტაცება (ბურღსატეხის სრული შეჩერება გრუნტის წინააღმდეგობის მომენტის ზემოქნმედებით).

Abstract

In process of drilling deep boreholes, existence of high moment on engine shaft at slow speed is necessary. In spite of great loss through first class friction viscosity of drilling pipes/columns on the walls of borehole, method of rotary drilling is more efficient and reliable. In addition to the circumstances, there is much fewer possibility of well distortion at the time of rotary drilling. Working specificity of drilling system makes difficult correct estimation of all mechanic influence imposed on the electric drive of rotary tables. Study of drive operating conditions, used for rotary tables of drilling equipments, allows us to qualitatively estimate all advantages and shortcomings of both drive itself and its operation scheme. Therefore the accuracy of types of current, engine and operation scheme mostly depend on regime, in which the drilling equipment has operate.

For this purpose in theses were analyzed following types of drilling equipments rotary table drive:

- Asynchronous drive with short circuit rotor: frequency transformer asynchronous drive (FT-AD) systems;
- Constant current: Generator-drive system (GD);
- Alternating current: quarry drive control system;

In addition following analysis have been conducted:

- Analysis of drilling pipe/column hunting during periodical undamped torsions –induced not by non-external periodical impacts, but parameters of system itself.
- Research of TDP (torsion drill pipes) torsion oscillation by method of ultimate differences and analogies. Method of ultimate differences is most common and approximate method of differential equations with particular derivatives

- Method of electromechanical analogies.
- Research of TDP (torsion drill pipes) torsion oscillation during stepwise growth of resistance moment on bit.
- Determination of effort during TDP (torsion drill pipes) torsion oscillation.

Each system of drive has been researched under following regimes of drilling plant operation.

- Launch of the column in free-running regime (while the bit is raised above the bottomhole).
- Loading on bit.
- Unloading (disruption of bit from bottomhole).
- Applying pulsating load on bit.
- Trapping of column (deceleration of column as a result of ground shedding in borehole).
- Trapping of bit (full shutdown of bit at the moment of ground resistance).



სურ.4. ელექტროამძრავის ტრანსვექტორული მართვის АД სისტემით სტრუქტურული სქემა.

დანართი 1.



სურ.5.ვექტორ-ფილტრის პლოკისა და როტატორის სტრუქტურული სქემა.



სურ.6.ნაკადის გარდაქმნის ბლოკის სტრუქტურული სქემა.



სურ.8.სიჩქარის გადამწოდი სტრუქტურული სქემა.



სურ.7. გახსნის_ბლოკის სტრუქტურული სქემა.



გელაშვილი გენადი

ღრმა ბურღვის საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდის ელექტროამძრავის სისტემების კვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი თბილისი, 0175, საქართველო სექტემბერი, 2010

საავტორო უფლება © 2010 გელაშვილი გენადი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ინფორმატიკის და მართვის სისტემების 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 ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი:	სრ. პროფ. გივი მაჩაბელი
ხელმძღვანელი:	ას. პროფ. ნინო მჭედლიშვილი
რეცენზენტი:	
რეცენზენტი:	
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი 2010 წელი

ავტორი: გელაშვილი გენადი

დასახელება: "<mark>ღრმა ბურღვის საბურღი დანადგარების როტორული</mark> მაგიდის ელექტროამძრავის სისტემების კვლევა"

ფაკულტეტი: ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დისერტაციის გაცნობის მიზნით დასახელების 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.

iii

სადისერტაციო ნაშრომს ვუძღვნი

ჩემ მშობლებს და დას.

Резюме

При бурении скважин большой глубины, требуется большой момент на валу двигателя при малой скорости. Несмотря на большие потери на вязкое трение первого рода колонны бурильных труб о стенки скважины, способ роторного бурения оказывается гораздо надежнее и эффективнее. Кроме этого обстоятельства, при роторном бурении вероятность искривления скважины гораздо меньше.

Специфичность работы буровой установки во многом усложняет правильную оценку всех тех механических воздействий, которым подвергается приводной электрический двигатель роторного стола. Изучение условий работы электродвигателей, применяемых в качестве приводных для роторного стола буровых установок, позволит качественно оценить достоинства и недостатки как самого электродвигателя, так и схемы управления им. Поэтому правильность рода тока, типа двигателя, схемы его управления во многом зависит от тех режимов, в которых приходится работать буровой установке.

Для этого в диссертации исследовались следующие системы электропривода роторного стола буровой установки:

- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором системы преобразователь частоы – асинхронный двигатель (ПЧ-АД);
- постоянного тока по системе генератор двигатель (Г-Д);
- пременного тока по системе трансвекторное управление приводом.

Также были проведены следующие анализы:

 Анализ крутильных автоколебаний колонны бурильных труб, когда в системе возникают незатухающие периодические колебания, вызванные не внешними периодическими воздействиями, а параметрами самой системы.

V

- 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.
- Метод электромеханической аналогии.
- Исследования крутильных колебаний КБТ при скачкообразном возрастании момента сопротивления на долоте.
- Определение напряжений при крутильных колебаниях колонны бурильных труб.

Каждая система электропривода исследовалась при следующих режимах работы буровой установки:

- пуск колонны в холостую (при поднятом над забоем долоте),
- наброс нагрузки на долоте;
- сброс нагрузки (срыв долота с забоя);
- при приложении пульсирующей нагрузке на долоте;
- прихват колонны (затормаживание колонны вследствие осыпания грунта в скважине)
- прихват долота (полная остановка долота под действием момента сопротивления грунта).

რეზიუმე

დიდი სიღრმის <u>ჭაბურღილების ბურღვისას საჭიროა</u> ძრავას ლილვზე მცირე სიჩქარისასდიდი მომენტის არსებობა. პირველი რიგის სვეტის ჭაპურღილის კედლებზე ბლანტი ხახუნის დროს დიდი ბურღვის დანაკარგების მიუხედავად, როტორული საშუალება საიმედოა. ამ გარემოეზის გაცილებით ეფექტური გარდა, და როტორული ბურღვის დროს ჭაპურღილის გამრუდების ალბათობა გაცილებით უფრო პატარაა.

საბურღი სისტემის მუშაობის სპეციფიურობა ბევრად ამნელებს მექანიკური ზემოქმედების სწორ შეფასებას, რომლებიც ყველა მოქმედებენ როტორული მაგიდის მიმყოლ ელექტროძრავაზე. ელექტროძრავების მუშაობის პირობების შესწავლა, რომლებიც ამძრავად გამოიყენება საბურღი დანადგარების როტორული მაგიდებისათვის, საშუალებას გვაძლევს ხარისხობრივად შევაფასოთ როგორც თავად მართვის ელექტრომრავის, მისი სქემის ასევე ღირსებები და ნაკლოვანებები. ამიტომ დენის სახის, ძრავის ტიპის, მისი მართვის სქემის სისწორე ბევრად არის დამოკიდებული რეჟიმზე, რომელშიც მუშაობა უხდება საბურღ მოწყობილობას.

მოცემულ დისერტაციაში გამოკვლეულია საბურღი დანადგარის როტორული მაგიდის ელექტროამმრავის შემდეგი სისტემები:

- ასინქრონული ძრავა მოკლედშეკრული როტორით სისტემა
 სიხშირის გარდამსახი ასინქრონული ძრავა (ПЧ-АД)
- გენერატორი-ძრავის სისტემა (Г-Д) მუდმივი დენის-ამძრავი;
- ცვლადი დენის ამძრავით ტრანსვექტორული მართვის სისტემაში.
 ჩატარებული იყო აგრეთვე შემდეგი ანალიზები:
- სმს-ის გრეხითი ავტორხევების ანალიზი, როდესაც სისტემაში
 წარმოიშვება არამილევადი პერიოდული რხავები, გამოწვეული
 არა გარე ზემოქმედებით, არამედ თვით სისტემის პარამეტრებით;
- სმს სასრული სხვაობების მეთოდით და ანალოგიის მეთოდით
 საგრეხი რხევების შესწავლა;;

vii

- ელექტრომექანიკური ანალოგიის მეთოდი;
- სმს საგრეხი რხევების შესწავლა ბურღსატეხზე წინაღობვის მომენტის ნახტომისებური ზრდისას;
- ძაბვების განსაზღვრა საბურღი მილების საგრეხი რხევების დროს;

ელექტროამპრავის თითოეული სისტემა გამოკვლეულია საბურღი დანადგარების მუშაობის შემდეგი რეჟიმების დროს:

- სვეტის უქმად სვლისას (სანგრევზე აღმართული ბურღსატეხის დროს);
- დატვირთვის გადასროლა პურღსატეხზე;
- დატვირთვის ჩამოყრა (პურღსატეხის მოწყვეტა სანგრევიდან);
- ბურღსატეხზე პულსირებადი დატვირთვის დადებისას;
- სვეტის მიტაცება (სვეტის დამუხრუჭება ჭაბურღილში გრუნტის ჩამოყრის შედეგად);
- ბურღსატეხის მიტაცება (ბურღსატეხის სრული შეჩერება გრუნტის წინააღმდეგობის მომენტის ზემოქნმედებით).

Abstract

In process of drilling deep boreholes, existence of high moment on engine shaft at slow speed is necessary. In spite of great loss through first class friction viscosity of drilling pipes/columns on the walls of borehole, method of rotary drilling is more efficient and reliable. In addition to the circumstances, there is much fewer possibility of well distortion at the time of rotary drilling.

Working specificity of drilling system makes difficult correct estimation of all mechanic influence imposed on the electric drive of rotary tables. Study of drive operating conditions, used for rotary tables of drilling equipments, allows us to qualitatively estimate all advantages and shortcomings of both drive itself and its operation scheme. Therefore the accuracy of types of current, engine and operation scheme mostly depend on regime, in which the drilling equipment has operate.

For this purpose in theses were analyzed following types of drilling equipments rotary table drive:

- Asynchronous drive with short circuit rotor: frequency transformer asynchronous drive (FT-AD) systems;
- Constant current: generator-drive system (GD);
- Alternating current: field-oriented control (FOC) system;

In addition following analysis have been conducted:

- Analysis of drilling pipe/column hunting during periodical undamped torsions –induced not by non-external periodical impacts, but parameters of system itself.
- Research of TDP (torsion drill pipes) torsion oscillation by method of ultimate differences and analogies. Method of ultimate differences is most common and approximate method of differential equations with particular derivatives
- Method of electromechanical analogies.

- Research of TDP (torsion drill pipes) torsion oscillation during stepwise growth of resistance moment on bit.
- Determination of effort during TDP (torsion drill pipes) torsion oscillation.

Each system of drive has been researched under following regimes of drilling plant operation.

- Launch of the column in free-running regime (while the bit is raised above the bottomhole).
- Loading on bit.
- Unloading (disruption of bit from bottomhole).
- Applying pulsating load on bit.
- Trapping of column (deceleration of column as a result of ground shedding in borehole).
- Trapping of bit (full shutdown of bit at the moment of ground resistance).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	21
Глава 1.	24
1.1 Электропривод ротора	24
1.2. Электропривод по системе Г-Д с тиристорным возбуждением	
генератора	33
Расчет и выбор силового электрооборудования привода. Выбор	
двигателя	34
Выбор генератора	35
Выбор гонного двигателя	36
Выбор тиристорного возбудителя двигателя	37
Выбор тиристорного возбудителя для генератора	38
Выбор автомата главного тока	38
Составление структурной схемы привода и расчет ее параметров	39
Расчет статических характеристик привода	42
Расчет динамических характеристик привода	46
1.3. Расчет автоматизированного электропривода системы ПЧ-АД	48
Выбор элементов силовой части электропривода	49
Выбор преобразователя частоты.	49
Выбор токоограничивающего реактора	50
Расчет общего сопротивления цепи	50
Расчет электромеханической и электромагнитной	F 0
постоянных времени	52
Расчет статических и динамических характеристик разомкнутой	53

системы

Расчет замкнутой системы по схеме с общим сумматором	55
Ограничение форсировок замкнутой системы	56
Статический расчет токовой отсечки	57
Определение устойчивости системы	59
Расчёт системы подчинённого регулирования	60
Расчёт обратной связи по току и регулятора тока	60
Расчёт обратной связи по скорости и регулятора скорости	62
Расчет задатчика интенсивности	62
Расчет задатчика интенсивности	63
Составление структурной схемы	63
Составление принципиальной схемы привода	65
Трансвекторное управление АД (FOC).	67
Глава 2.	76
2.1 Анализ крутильных автоколебаний колонны бурильных труб (КБТ)	76
2.2 Режимы работы колонны бурильных труб в процессе бурения	84
шарошечными долотами	01
2.3 Исследования крутильных колебаний КБТ методом конечных	07
разностей и методом аналогий	92
2.4 Метод электромеханической аналогии	98
2.5 Исследования крутильных колебаний КБТ при скачкообразном	104
возрастании момента сопротивления на долоте	
Определение напряжений при крутильных колебаниях колонны	108

бурильных труб

2.6 Разработка и принцип построения модели КБТ	116	
Глава З	130	
Исследование условий работы электропривода роторного стола	100	
буровых установок.	130	
Анализ динамических режимов электроприводов роторного стола в	100	
системе «ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».	132	
3.1 Анализ режимов пуска в системе «ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».	133	
3.2 Анализ режимов наброса нагрузки на долото в системе	107	
«ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».	137	
3.3 Анализ режимов сброса нагрузки на долоте в системе	1 / 1	
"Электропривод - КБТ"	141	
3.4 Анализ переходных режимов приложения пульсирующей нагрузки	111	
на долото в системе «Электропривод-КБТ».	144	
3.5 Анализ режимов прихвата колонны в системе «Электропривод-	147	
КБТ».	147	
3.6 Анализ режимов прихвата долота в системе «Электропривод-КБТ».	150	
Список использованной литературы	153	

ცხრილების ნუსხა

Таблица 1.1Необходимые физические константы применяемых	
сталей	25
Таблица1.2. Технические характеристики двигателя.	34
Таблица1.3. Краткая техническая характеристика генератора	36
Таблица1.4. Краткая техническая характеристика двигателя.	37
Таблица1.5. По всем параметрам подходит реверсивный	
тиристорный возбудитель	48
Таблица1.6. Паспортные данные электродвигателя	49
Таблица1.7. Паспортные данные преобразователя частоты	50
Таблица1.8. Базисные величины	70

ნახაზების ნუსხა

	Рис. 1.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД РОТОРА	24
	Рис. 1.2. Структурная схема электропривода по системе Г-Д с	20
	тиристорным возбуждением генератора	39
	Рис.1.3. Преобразованная структурная схема.	43
	Рис.1.4. Динамическая характеристика привода.	47
	Рис.1.5. Статическая характеристика привода.	47
	Рис.1.6. Структурная схема разомкнутой системы.	53
	Рис.1.7. Переходной процесс по току в разомкнутой системе.	54
	Рис.1.8. Переходной процесс по скорости в разомкнутой системе	54
	Рис.1.9. Структурная схема замкнутой системы.	55
	Рис.1.10. Общий вид датчика тока	57
	Рис.1.11. Упрощенная структурная схема замкнутой системы	59
	Рис.1.12. Принципиальная схема регулятора тока	61
	Рис1.13. Принципиальная схема регулятора скорости	62
	Рис.1.14. Структурная схема замкнутой системы подчиненного	63
	регулирования	
	Рис.1.15. Переходной процесс по скорости в системе с	64
	подчиненным регулированием.	04
	Рис.1.16. Переходной процесс по току в системе с подчиненным	64
	регулированием	64
	Рис.1.17. Принципиальная схема привода	65
	Рис.1.19. Структурная схема модели системы векторного	
)	правления в осях (а — β)	68
	Рис.1.20. Структурная схема вектор-фильтра и ротатора.	72

Рис.1.21. Структурная схема устройства идентификации	72	
потокосцепления ротора		
Рис.1.22. Структурная схема блока развязки.	72	
Рис. 1.23.Структурная схема устройства индентификации частоты вращения АД.	72	
Рис.1.24.Функциональная схема асинхронного электропривода с	73	
векторным управлением без датчика скорости	70	
Рис.1.25. Линейная структурная схема канала регулирования	75	
Рис.2.1.1. Блок-схема моделирования с помощью програмного	0.0	
расширения Simulink	80	
а) зависимость относительной деформации $\frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial x}$ от времени \overline{t} в	81	
сечении 4,		
б) зависимость угла поворота нижнего сечения колонны от	01	
времени $\overline{\phi}(t)$ 2,	81	
Рис.2.1.3. Зависимость максимального тангенциального		
напряжения в забойной части колонны $\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$ от времени \overline{t}	83	
Рис.2.2.1. Буровая оснастка	84	
Рис.2.2.2. Динамика колебания КБТ в процессе бурения		
шарошечными долотами	89	
Рис. 2.3.1. Звено дискретной цепочки с учетом действующих сил,		
являющейся аналогом колонны бурильной трубы	93	
Рис 2.3.2. Элемент упругого стержня	94	
Рис.2.3.3. Блок-схема набора модели в программе Simulink	97	
Рис. 2.4.1. График изменения $\overline{u(x,t)}$ для $\chi = 0.4$ разных сечений		
колонны, начиная $x = 0$ с шагом $\overline{x} = 0.2$.	103	
Рис. 2.5.1. Схема исследования динамики вращательного	100	
движения колонны труб	100	

Рис.2.5.2. Зависимости $\varphi(x,t)$ при различных x (графики	
напряжений крутильных колебаний КБТ в разных сечения	113
колонны)	
Рис 2.6.1. Принципиальная схема для расчета КБТ	116
Рис. 2.6.2. Блок-схема модели буровой колонны при	
<i>М</i> _{дол} = 426,9 и <i>n</i> =4	119
Рис.2.6.3. Зависимость ω_i от t при $n=5$ и $M_{don} = 426,9$	121
Рис.2.6.4. Зависимости ϖ_i от t при различных значения х $M_{_{\partial O^{7}}}$	121
Рис. 2.6.5. Блок-схема модели буровой колонны при $M_{don} = 426,9$	
и <i>n</i> =7	122
Рис. 2.6.6. Зависимость ω_i от <i>t</i> при <i>n</i> =7 $M_{\partial o n} = 426,9$	122
Рис. 2.6.7. Зависимость ω_i от t при различных значениях n	126
Рис.3.1. Блок-схема связи КБТ и схемы электропривода	130
Рис.3.2.Анализ режимов пуска в системе «ЭЛЕКТРОПРИВОД-	10.4
КБТ»	134
Рис.3.3. Режим пуска в асинхронном электроприводе при	125
трансвекторном управлении.	155
Рис.3.4.Анализ режимов наброса нагрузки на долото в системе	120
«ЭЛЕКТРОПРИВОД-КБТ».	130
Рис.3.5. Режим наброса нагрузки в асинхронном электроприводе	120
при трансвекторном управлении.	139
Рис.3.6 Анализ режимов сброса нагрузки на долоте в системе	120
"Электропривод - КБТ"	139
Рис.3.7. Анализ переходных режимов приложения	
пульсирующей нагрузки на долото в системе «Электропривод-	141
КБТ».	

Рис.3.8. Анализ режимов прихвата колонны в системе	144	
«Электропривод-КБТ»		
Рис.3.9. Анализ режимов прихвата долота в системе	1.4.6	
«Электропривод-КБТ»	146	

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, რომლებსაც გააჩნიათ ადამიანებს, ითით მეცნიერული ალღო და გამოცდილება, პასუხისმგებლობის მაღალი გრძნობა, დადეზითი 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 ძალიან ახლობელსა და საყვარელ ადამიანებს, ჩემს თანამშრომლებს, რომლებიც მთელი ამ ხნის განმავლობაში მხარში მედგნენ, მაძლევდნენ სასარგებლო რჩევებს და სამუშაო პირობებს მიქმნიდნენ.

XX

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.

До последнего времени в автоматизированном электроприводе исполнительных механизмов буровых установок основные применения получили средство компьютерной техники.

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 пауз, т.е. автоматическая диагностика состояния оборудования и раннее предупреждение аварий. Эти возможности дополняются развитыми средствами борьбы с помехами. Главное здесь замена аналоговых линий передачи информации цифровыми содержащими 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.

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).

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 АВВ 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 НХR, 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.

Глава 1.

1.1. ЭЛЕКТРОПРИВОД РОТОРА



Рис.1.1

При роторном бурении приводной двигатель расположен у устья скважины. Передача вращения от двигателя к долоту осуществляется сложной системой различных передач, муфт и колонной бурильных труб, на конце которой закреплено само долото.

На рис.1.1 представлена типовая схема буровой установки для роторного бурения. Буровая вышка (1) служит для закрепления талевой системы (2), с помощью которой осуществляется спуско-подъемные операции колонны бурильных труб (7). Вращение от электродвигателя (6) через систему передач (5) передается на роторный стол (4). Ведущая штанга (3) квадратного сечения, на конце которой закреплена КБТ, передает вращение роторного стола к долоту (9). Колонна бурильных труб одновременно с функцией передачи вращения осуществляет еще и функцию подвода промывочной жидкости к долоту. Промывочная жидкость, помогает процессу разрушения породы и после этого возвращается к устью скважины по свободному пространству между стенками (8) и КБТ.

Для предотвращения обвала скважины и осыпания грунта по мере увеличения глубины бурения, после прохождения определенного интервала в скважину опускаются обсадные колонны (8), наружный диаметр которых соответствует диаметру долота. После закрепления и цементирования обсадных колонн бурение продолжается долотами меньшего диаметра. Кроме своего основного назначения обсадные колонны, уменьшая в значительной степени величину коэффициента трения КБТ о стенки скважины, способствует в какой-то мере уменьшению нагрузки на приводном двигателе ротора.

КБТ, состоящая из утяжеленных и обычных бурильных труб, переводника и ведущей трубы, присоединяется к долоту и вместе с ним образует буровой инструмент. КБТ при роторном бурении представляет собой вращающийся вал и передает энергию на забой. Основные функции КБТ при роторном бурении следующие: передача вращения момента от ротора к долоту, создание осевой нагрузки, обеспечение канала для подвода

промывочной жидкости к долоту и, следовательно, энергии для очистки забоя. КБТ можно рассматривать как резервуар, заполненный жидкостью под высоким давлением, нагруженный кроме внутреннего давления также крутящими, изгибающими, растягивающими и сжимающими силами. Сложный характер нагрузок бурильных труб, получающийся в результате одновременного действия основных напряжений, а также изменение во времени ряда основных напряжений обуславливают необходимость учета долговечности материала труб при переменных нагрузках и его предела усталости. Основными напряжениями в бурильной колонне являются:

а) напряжение растяжения, вызываемое собственным весом КБТ;

б) колеблющееся между положительным и отрицательным максимальными значениями напряжение изгиба, возникающее при отклонении скважины от вертикали или при исривлении бурильных труб во время вращения;

в) колебательные нагрузки, вызванные вращающим моментом, который должен передаваться от ротора к долоту.

Бурильные трубы различаются по номинальному диаметру. В эксплуатационном бурении наиболее широко применяются трубы диаметрои 114, 127, 140 мм. Трубы каждого диметра выпускаются с различной толщиной стенок. Чаще всего применяются трубы с толщиной стенок 8.9 и 10 мм. Наиболее распространены стальные бурильные трубы, изготовленные из углеродистых и легированных сталей. Необходимые физические константы применяемых сталей приведены в таблице 1.1.

Наименование	Обозначение	Сталь
Удельная плотность, г/см ³	γ	7.8
Модуль упругости, кгс/мм ²	Е	21000
Модуль сдвига, кгс/мм ²	G	8100
Скорость распространения прдоль	Спр	5050

ных волн в стержнях, м/с		
Скорость распространения поперечных	Сп	3300
волн, м/с		
Предел прочности, кгс/мм ²	σ_{np}	/65-90/
Предел текучести, кгс/мм²	$\sigma_{\rm T}$	/38-75/
Ударная вязкость, кгс.м/см ²		4
Относительное удлинение, %	δ	/10-16/

Требования, предъявляемые к электроприводам роторного стола.

Соответствие конструктивных и технических данных электропривода необходимым условиям работы механизма является требованием, выполнение которого обеспечивает мимнимальную стоимость электрооборудования, высокую надежность работы и наименьшие потери электроэнергии в эксплуатации. Эти общие требования, предъявляемые к электроприводу любого производственного механизма, распространяются и на привод роторного стола. Однако ввиду специфичности данного механизма, где передача вращения от двигателя к исполнительному механизму (долоту) осуществляется колонной бурильных труб, длина которой достигает нескольких километров, к электроприводу роторного стола предъявляется ряд дополнитребований, имеющих существенно тельных важное значение для нормальной работы буровой установки.

Одним из основных требований, предъявляемых к электроприводу роторного стола, является дипозон регулирования скорости. При разбуривании пород разной твердости требуются различные скорости бурения. Так, мягкий грунт можно преодолеть на больших скоростях, а твердые породы требуют уменьшения скорости, вследствие возрастания усилсия на бурение.

Сохранение постоянной потребляемой электродвигателем мощности возможно при том условии, что по мере увеличения глубины скважины

(соответственно веса КБТ) и разбуривании более твердых пород скорость двигателя уменьшилась бы соответствующим образом.

Итак, исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что диапозон регулирования скорости двигателя роторного стола должен быть достаточно большим, чтобы обеспечить нормальный режим бурения и максимально использовать двигатель по мощности. В современных буровых установках грузоподъемностью от 100 до 250 тс диапозон регулирования скорости электропривода роторного стола составляет 1:10.

На всех буровых установках вращение от двигателя к роторному столу передается через систему механических передач, с помощью которых возможно также осуществить ступенчатое регулирование скорости вращения роторного стола, и соответственно КБТ. Обычно количество ступеней механических передач ограничено, что связано с габаритами редуктора, и разность между двумя соседними скоростями может оказаться недопустимо большой. Появляется необходимость плавного изменения скорости, что положительно сказывается на производительности всей буровой установки. Плавное регулирование скорости требуется и во избежании резких толчков моментов в КБТ, способных повлиять на прочность труб.

Одним из основных параметров, характеризующих прочность КБТ при ее вращении, является угол закручивания колонны φ . Максимально угол закручивания, зависящий от прочности материала КБТ, определяется как:

$$\left[\varphi_{\partial on}\right] = \frac{2M_{k\partial \partial o} \cdot l}{dGW_{p}},\tag{1.1}$$

где $M_{_{\kappa don}}$ - максимально допустимый действующий момент;

l - длина КБТ; d - диаметр КБТ; G - модуль упругости; Wp - полярный момент инерции. $M_{solon} = Wp[\tau_{don}],$ (1.2)

 $[au_{\scriptscriptstyle don}]$ - предел прочности материала КБТ при кручении

 $[\tau_{\partial on}] = 22,8\kappa c / MM^2$.

Окончательно

$$[\varphi_{\partial on}] = \frac{2 \cdot l}{dG} [\tau_{\partial on}] = \frac{2 \cdot 22.8 \cdot l}{8.1 \cdot 10^3 \cdot d} = 5.63 \cdot 10^{-3} \frac{l}{d} pad$$
(1.3)

Допустимые углы закручивания для разных глубин бурения примут следующие значения:

- 1. 1000 м [*φ*_{∂ол1000}] = 40 рад. (d = 141 мм);
- 2. 3000 м [$\phi_{\partial on 3000}$] = 120 рад. (d = 141 мм);
- 3. 4000 м [φ_{дол4000}] = 160 рад. (d = 141 мм);
- 4. 5500 м [*φ*_{∂ол5500}] = 272 рад. (d = 141 мм).

Так как обычно КБТ в процессе бурения находится в скрученном состоянии, то резкое изменение скорости двигателя может привести к недопустимым увеличениям угла закручивания, тогда как при срыве долота и резком увеличении его скорости возможны отрицательные значения φ и появляется опасность развинчивания труб, составляющих колонну.

Таким образом, от величины плавности регулирования скорости приводного двигателя роторного стола во многом зависит устойчивость работы всей буровой установки.

Несомненно, одним из важных требований, предъявляемых к электроприводу роторного стола, является его быстродействие. Поступление на вход системы информации о характере изменения нагрузки на долоте происходит с некоторым запаздыванием, вследствие того обстоятельства, что КБТ является системой С распределенными параметрами. Время, необходимое для поступления сигнала с долота на вход системы, отработки самим электроприводом соответствующей полученной команды, информации, и возвращение импульса этой команды к исполнительному механизму в ряде случаев может оказаться недопустимо большим, так как за это суммарное время переходного процесса моменты в сечениях колонны,

продолжающей скручиваться, могут превысить допустимые значения по условиям прочности. При прихвате долота, когда инструмент полностью останавливается, а двигатель продолжает вращаться и скручивать колонну, несвоевременная остановка электропривода может привести к недопустимым перенапряжениям в КБТ и, как следствие, к ее поломке. Электрический двигатель по возможности в самый малый срок должен реагировать на любое изменение момента как на долоте, так и в колонне. Выполнение электроприводом роторного стола всех вышеописанных требований является залогом безаварийной, надежной работы всей буровой установки.

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;

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.

1.2. Электропривод по системе Г-Д с тиристорным возбуждением генератора

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).

Рассмотрим электропривод по системе Г-Д с тиристорным возбуждением генератора находит широкое применение во многих отраслях промышленности. Достаточно сказать, что большинство мощных электроприводов постоянного тока различного назначения выполнены по системе Г-Д. Это объясняется рядом ее важных преимуществ по сравнению с другими приводами;

-высокая жесткость механических характеристик;

-большой диапазон и плавность регулирования скорости;

-отсутствие пусковых сопротивлений и потерь энергии в них;

-простота реверса двигателя без переключений в цепи якоря;

-простота перевода привода в режимы торможения с рекуперацией энергии в сеть;

-относительная простота схемного решения системы управления приводом, не требующая высокой квалификации обслуживающего персонала. Наряду с перечисленными достоинствами система Г-Д не лишена существенных недостатков, к числу которых относятся:

- недостаточное быстродействие привода;

- неустойчивая работа двигателя в зоне низких скоростей,

ограничивающая диапазон регулирования;

низкий коэффициент полезного действия, не превышающий 75-80%;

- высокая установленная мощность, равная трехкратной мощности

регулируемого двигателя; - большая занимаемая площадь.

Расчет и выбор силового электрооборудования привода.

Выбор двигателя.

Исходные данные:

F1=13т; F2=16.25т; F3=10.5т; F4=3,3т; F55.3т

t1=13сек; t2=20сек; t3=52сек; t 4=20сек; t5=13сек

намагничивающая сила обмоток управления

время паузы: t6=100сек.

Определяем эквивалентную мощность *Fэкв:*

$$F_{\mathcal{F}\mathcal{K}\mathcal{B}} = \sqrt{\frac{F_1^2 * t_1 + F_2^2 * t_2 + F_3^2 * t_3 + F_4^2 * t_4 + F_5^2 * t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}} = \sqrt{\frac{13^2 * 13 + 16.25^2 * 20 + 10.5^2 * 52 + 3.3^2 * 20 + 5.3^2 * 13}{13 + 20 + 52 + 20 + 13 + 100}} = 276m$$

Выбор двигателя должен удовлетворять неравенствам:

 $P \Rightarrow \phi \le P$ н.дв $I \Rightarrow \phi \le I$ н.дв $M \Rightarrow \phi \le M$ н.дв

Таблица1.2. Технические характеристики двигателя.

Мощность, кВт	315
Напряжение номинальное. В	440
Напряжение возбуждения, В	220
Частота вращения номинальная, об/мин	36
КПД,%	
Сопротивление обмотки при 15°, 0м	
якоря	0,00895
добавочных полюсов	0,0012
Ток двигателя номинальный, А	920
Динамический момент инерции 1000 кгм	1.2

Произведем дополнительные вычисления:

мощность возбуждения:

Рв=3%**Рдв*=0.03*315=9.45 кВТ

ток возбуждения:

$$I_{e} = \frac{P_{e,\partial e}}{U_{e,\partial e}} = \frac{9450}{220} = 43$$

сопротивление возбуждения:

$$R_{e} = \frac{U_{e,\partial e}}{I_{e,\partial e}} = \frac{220}{43} = 5,150M$$

Выбор генератора.

Генератор выбираем по напряжению и мощности двигателя [3].

Uном. $r \geq U$ ном.д

Ія.ном.г ≥ Ія.ном.д

$$P_{\Gamma} = \frac{P_{\partial}}{\eta_l}, \kappa Bm$$

где: Рг - мощность генератора, кВт;

Рд - мощность двигателя, кВт;

$$\eta$$
 - кпд двигателя, о.е;

Ія.ном.г – номинальный ток якоря генератора, А;

Ія.ном.д- номинальный ток якоря двигателя, А.

Скорость двигателя не является критерием при выборе генератора.

$$P_{e} = \frac{P_{o}}{\eta_{o}} = \frac{315}{0.78} = 404\kappa Bm$$

Таблица1.3. Краткая техническая характеристика генератора.

Мощность, кВт	_ 430
Напряжение якоря, В	_460
Номинальная частота вращения, об/мин	_1000
Напряжение возбуждения, В	_220
КПД, %	_93,5

Вычислим ток якоря генератора:

$$I_{\text{{\tiny R.HOM,2}}} = \frac{1000 * P_{\text{{\tiny 2}}}}{U_{\text{{\tiny 2}}} * \eta_{\text{{\tiny 2}}}} = \frac{1000 * 430}{460 * 0,935} = 1000A$$

Выбранный нами генератор удовлетворяет неравенствам:

Uном.г≥ *Uном.д*, т.е. 460 (В) > 440 (В)

Ія.ном.г > Ія.ном.д, т.е. 1000 (А) >920А)

Выбор гонного двигателя.

Основной критерий выбора гонного двигателя - это равенство скоростей вращения якоря генератора и ротора гонного двигателя

Кроме того нужно учитывать:

$$U_{\text{гон}} = U_{\text{с}}$$

$$P_{\text{гон}} = \frac{P_{\text{c}}}{\eta_{\text{c}}}$$

где

*U*гон.д- напряжение гонного двигателя, В;

Ргон.д – мощность гонного двигателя, кВт.

$$P_{\text{гон.}\partial} = \frac{P_{\text{c}}}{\eta_{\text{c}}} = \frac{440}{0,935} = 434\kappa Bm$$

Таблица1.4. Краткая техническая характеристика двигателя.

Мощность, кВт	440
Скорость ротора, об/мин	1000
Скольжение, %	1,5
КПД,%	94,4
<i>cos</i> , %	0,86

Выбор тиристорного возбудителя двигателя.

Тиристорный возбудитель двигателя должен обеспечивать три режима:

- ослабленный;
- форсированный;
- нормальный.

В ослабленном режиме:

$$U_{ocn} = 0.3U_{e.hom.\partial} = 0.3*220 = 66B$$
$$I_{ocn} = 0.3I_{e.hom.\partial} = 0.3*43 = 13A$$

В номинальном режиме работы:

$$U_{\rm h} = U_{\rm 6.hom.d}$$
$$I_{\rm 6.hom.mgd} = I_{\rm 6.hom.d}$$

В форсированном режиме:

Uфор=(3-4) Uв.ном.д=660В

Мощность тиристорного возбудителя двигателя:

Sтвд = *Uв.ном.дІв.ном.дКп*,

где

Кп = 1,04 - 1,05 - повышающий коэффициент мощности трансформатора.

Sтвд = *Uв.ном.д Iв.ном.д Кп* = 220 *43 * 1,04 = 9838 ВА

По всем параметрам подходит нереверсивный тиристорный возбудитель [3]:

Напряжение питания сети	190-220 B
Номинальный выпрямленный ток	50 A
Максимальный ток	100 A
Номинальная мощность	11.5 кВт

Выбор тиристорного возбудителя для генератора.

Uтвг.max =1.15 *Uв.ном.г* = 1,15*230=264,5В

Таблица1.5. По всем параметрам подходит

реверсивный тиристорный возбудитель:

Напряжение питания сети _____190-220В

Номинальный выпрямленный ток ____50 А

Максимальный ток _____100 А

Номинальная мощность _____11.5 кВт

Выбор автомата главного тока.

Автомат главного тока выбирают по максимальному току и

выпрямленному напряжению.

Imax= 2,5*Iд.ном* = 2,5* 920 = *2300 A*
Номинальный ток ______ 2500 А Номинальное напряжение ______600 В

Составление структурной схемы привода и расчет ее

параметров.

На рисунке представлена структурная схема электропривода по системе Г-Д с тиристорным возбуждением генератора.

Двигатель представлен колебательным звеном, а генератор и тиристорный преобразователь представлены апериодическими звеньями (рис.1.2.)



$$K_e = \frac{U_{\scriptscriptstyle H.\partial} - I_{\scriptscriptstyle g.\partial} * R_{\scriptscriptstyle g.\partial}}{n_{\scriptscriptstyle H}}$$

где

Uн.д - номинальное напряжения двигателя, В *1я.д* - номинальный ток якоря двигателя, А *Rя.д* - сопротивление якорной цепи двигателя, Ом *n*_н - номинальные обороты двигателя, об/мин

$$K_{e} = \frac{U_{\mu,\partial} - I_{\mu,\partial} * R_{\mu,\partial}}{n_{\mu}} = \frac{440 - 920 * 0.008}{36} = 12$$
$$R_{\mu,e} = 0.5(1 - \eta) \frac{U_{\mu,e}}{I_{\mu,e}}, OM$$
$$K_{\mu} = \frac{K_{e}}{1.03} = \frac{12}{1.03} = 11.6$$

Определим сопротивление якорной цепи генератора,

где

$$\eta$$
-КПД генератора, о.е.

Uн.г-номинальное напряжение генератора, В

Ін.г -номинальный ток генератора, А

$$R_{_{\mathfrak{H},\mathcal{C}}} = 0.5(1-\eta)\frac{U_{_{_{\mathcal{H},\mathcal{C}}}}}{I_{_{_{\mathcal{H},\mathcal{C}}}}} = 0.5(1-0.93)\frac{460}{934} = 0.016OM$$

Определим суммарное сопротивление якорной цепи двигателя и генератора

$$R_{_{\mathfrak{R},\Sigma}} = R_{_{\mathfrak{R},\partial}} + R_{_{\partial.n,\partial}} + R_{_{\mathfrak{R},\mathcal{C}}}, OM$$

где

Кя.д -сопротивление якоря двигателя, Ом

Rд.п.д -сопротивление добавочных полюсов двигателя, 0м

Rя.г - сопротивление якоря генератора, Ом

Причем, сопротивления *R*, *R*, *R*, входящие в эту электрическую

цепь мы не учитываем т.к. их величины на два порядка меньше сопротивлений представленных в этой формуле.

$$R_{_{\mathcal{R},\Sigma}} = R_{_{\mathcal{R},\partial}} + R_{_{\partial.n,\partial}} + R_{_{\mathcal{R},\mathcal{P}}} = 0.008 + 0.0012 + 0.016 = 0.025OM$$

Определим электромеханическую составляющую привода:

$$GD^{2} = (J_{\partial 6} + J_{pM})^{*} 4g = (J_{\partial 6} + 1.2J_{\partial 6})^{*} 4g, \kappa \mathcal{E}^{*} \mathcal{M}^{2};$$

$$GD^{2} = (J_{\partial 6} + 1.2J_{\partial 6})^{*} 4g = (1200 + 1.2 * 1200)^{*} 4 * 9.8 = 103.7 \kappa \mathcal{E}^{*} \mathcal{M}^{2};$$

rge

Јдв-момент инерции двигателя,

Јдв = 1.2*Јдв* -момент инерции рабочей машины,

g=9,8-ускорение свободного падения, м/с²

Определим индуктивность якоря генератора:

$$\begin{split} T_{_{M}} &= \frac{GD^{2} * R_{_{R\Sigma}}}{375 * K_{_{e}} * K_{_{M}}} \\ T_{_{M}} &= \frac{GD^{2} * R_{_{R\Sigma}}}{375 * K_{_{e}} * K_{_{M}}} = \frac{103.7 * 0.026}{375 * 12 * 11.6} = 0.05c \\ L_{_{R,e}} &= 0.55 \frac{30 * U_{_{HOM}}}{\pi * I_{_{HOM}} * n_{_{HOM}} * p} = 0.55 \frac{30 * 460}{3.14 * 934 * 1000 * 6} = 0.431 * 10^{-3} \Gamma H \\ \text{где} \end{split}$$

Uном - номинальное напряжение генератора, В

1ном - номинальный ток генератора, А

пном - номинальная скорость вращения, об/мин

p = 6-число пар полюсов генератора

Найдем суммарную индуктивность двигателя и генератора:

$$L_{g,y,\Sigma} = L_{g,\partial e} + L_{g,e}$$
$$L_{g,y,\Sigma} = (3.4 + 0.431) * 10^{-3} = 3.831 * 10^{-3} \Gamma H$$

Определим постоянную времени якорной цепи привода:

$$T_{g} = \frac{L_{g,y,\Sigma}}{R_{g,y,\Sigma}} = \frac{3.831^{*}10^{-3}}{0.025} = 0.12c$$

Постоянная времени T = 0,003 для многоканальной СИФУ.

где

Рном - номинальная мощность генератора, кВт

$$T_{e} = \sqrt{\frac{1000 * P_{HOM}}{n_{HOM} * (2p)^{2}}}, c;$$

пном -номинальное число оборотов генератора, об/мин

$$T_{e} = \sqrt{\frac{1000*P_{_{HOM}}}{n_{_{HOM}}*(2p)^{2}}} = \sqrt{\frac{1000*430}{1000*6^{2}}} = 3.45c$$

Найдём,

$$K_{z} = \frac{U_{zeh}}{U_{go36,zeh}} = \frac{430}{220} = 1.95$$

$$K_{mer} = \frac{U_{e.r}}{U_{ynp.max}} = \frac{220}{10} = 22B$$

где *U упр. тах* - максимальное напряжение управления В.

Расчет статических характеристик привода.

Для дальнейших расчетов необходимо преобразовать исходную структурную схему (рис.1.3.):



Для преобразованной структурной схемы запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} n(p) = \frac{R_a}{T_m p K_e} * I_{\delta}(p) \\ I_c(p) = \frac{1}{K_m} * M_c(p) \\ I_s(p) = \frac{1/R_a}{T_a p + 1} * U_c^1(p) \\ U_c(p) = \frac{K_c}{T_c p + 1} * U_s(p) \\ U_e(p) = \frac{K_{mec}}{T_\mu p + 1} * U_c(p) \\ E_{\delta}(p) = K_e * n(p) \\ U_{om}(p) = K_m * I_s(p) \\ I_{\delta}(p) = I_s(p) - I_c(p) \\ U_c(p) = U_c(p) - E_{\delta}(p) \\ U_c(p) = U_{ynp}(p) - U_{om}(p) \\ I_{\delta} = \frac{T_m p K_e}{R_a} * n \\ I_c = \frac{1}{K_m} * M_c \\ I_s = I_{\delta} + I_c \end{cases}$$

Воспользуемся методом подстановок приведенных выражений друг в друга **и** ориентируясь на то, что в левой части - скорость, а в правой - момент конечном выражении получим:

$$n = \frac{K_{mer}K_{r}U_{ynp}K_{M}R_{a} - K_{mer}K_{r}K_{m}M_{c}R_{a} - R_{a}R_{a}M_{c}(T_{a}p+1)(T_{\mu}p+1)(T_{r}p+1)}{K_{M}K_{mer}K_{r}K_{m}T_{M}pK_{e} + K_{M}K_{e}(T_{\mu}p+1)(T_{r}p+1)R_{a} + K_{M}T_{M}pK_{e}(T_{a}p+1)(T_{\mu}p+1)(T_{r}p+1)R_{a}}$$

Предположим, что *p*=0 (для замкнутой системы):

$$n = \frac{K_{mec}K_{c}U_{ynp}}{K_{e}} - \frac{K_{mec}K_{c}K_{m}M_{c}}{K_{e}K_{m}} - \frac{R_{a}M_{c}}{K_{e}K_{m}}$$

Предположим, что *Кт* = 0 (разомкнутая система):

$$n = \frac{K_{mec}K_{c}U_{ynp}}{K_{e}} - \frac{R_{a}M_{c}}{K_{e}K_{M}}$$

$$\begin{cases} n(p) = \frac{R_a}{T_{_M}pK_e} * I_{\delta}(p) \\ I_c(p) = \frac{1}{K_m} * M_c(p) \\ I_s(p) = \frac{1/R_a}{T_a p + 1} * U_c^1(p) \\ U_c(p) = \frac{K_c}{T_c p + 1} * U_s(p) \\ U_s(p) = \frac{K_{msc}}{T_\mu p + 1} * U_c(p) \\ E_{\delta}(p) = K_e * n(p) \\ U_{om}(p) = K_m * I_s(p) \\ I_{\delta}(p) = I_s(p) - I_c(p) \\ U_c(p) = U_c(p) - U_{om}(p) \end{cases}$$

Расчет динамических характеристик привода.

Преобразуем исходную систему уравнений методом подстановки.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{R_a * I_o}{T_m * K_e} = \frac{R_a * (I_s - I_c)}{T_m * K_e} = \frac{R_a * (I_s - \frac{1}{K_m} * M_c)}{T_m * K_e}$$

$$\frac{dI_s}{dt} = \frac{(\frac{1}{R_a}) * U_c^1 - I_s}{T_a} = \frac{(\frac{1}{R_a}) * (U_c - E_o) - I_s}{T_a} = \frac{(\frac{1}{R_a}) * (U_c - K_e * n) - I_s}{T_a}$$

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{K_c * U_e - U_c}{T_c}$$

$$\frac{dU_e}{dt} = \frac{K_{mec} * U_c - U_e}{T_\mu} = \frac{K_{mec} * (U_{ynp} - U_{mo}) - U_e}{T_\mu} = \frac{K_{mec} * (U_{ynp} - K_m * I_s) - U_e}{T_\mu}$$

Сделаем замену и подставим в систему уравнений.

$$F(1) = \frac{dU_{s}}{dt}; Y(1) = U_{s}$$

$$F(2) = \frac{dU_{z}}{dt}; Y(2) = U_{z}$$

$$F(3) = \frac{dI_{s}}{dt}; Y(3) = I_{s}$$

$$F(4) = \frac{dn}{dt}; Y(4) = n$$

$$F(1) = \frac{K_{msc}(U_{ynp} - K_m * Y(3)) - Y(1)}{T_{\mu}}$$

$$F(2) = \frac{K_{z} * Y(1) - Y(2)}{T_{z}}$$

$$F(3) = \frac{(\frac{1}{R_a}) * (Y(2) - K_s * Y(4)) - Y(3)}{T_{z}}$$

$$F(4) = \frac{R_a * (Y(3) - \frac{1}{K_m} * M_c)}{T_m * K_e}$$



Рис.1.4. Динамическая характеристика привода.



Рис.1.5. Статическая характеристика привода.

1.3. Расчет автоматизированного электропривода системы ПЧ-АД.

Исследователи и инженеры, работающие в области 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.

48

Выбор элементов силовой части электропривода.

Выбор двигателя.

Паспортные данные электродвигателя приведены в табл. 1.6.

	1 1	
Ιαόπ	16	
1 a 0 /1.	1.0.	

Наименование параметра	Величина и
	размерность
Номинальная мощность, Р _н	550 кВт
Номинальная частота вращения ротора, ω _н	980 об/мин
Номинальное питающее напряжение, U _н	6000 B
Номинальная частота питающего напряжения, f _н	50 Гц
Номинальный ток статора, I1н	59,0 A
Номинальный ток сротора, I2н	350 A
Активное сопротивление фазы статора, Rст	0,737 Ом
Активное сопротивление фазы ротора, R _{рот}	0,677 Ом
Момент инерции двигателя, J	107 кг·м ²
Номинальный КПД, η	0,93
Индуктивность статорной обмотки, L _{ст}	0,128 Гн
Номинальный коэффициент мощности, cosф	0,87

Выбор преобразователя частоты.

Выбор преобразователя частоты производим исходя из условий:

$$I_{_{6bl}q,nq} \ge I_{_{1H}};$$
 (1.3.1)

$$U_{\rm GBIX, BY} \ge U_{\rm 1H}; \tag{1.3.2}$$

Условиям (1.3.1) и (1.3.2) удовлетворяет преобразователь частоты VSI -7,5 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 [3].

Наименование параметра	Величина
Номинальная выходная мощность ПЧ, кВт	3x200
Номинальный ток нагрузки, А	18
	380(+10%-
Номинальное напряжение на входе, В	15%)
Диапазон регулирования напряжения, В	0 — Uсети
Частота питающей сети, Гц	50±5%
Диапазон регулирования частоты, Гц	2-70
Коэффициент мощности в номинальном режиме, не	
менее	0,90
Кратность тока перегрузки	1,5Іном

Таблица1.7. Паспортные данные преобразователя частоты.

Выбор токоограничивающего реактора.

Выбираем токоограничивающий реактор из условия:

$$I_{TOPHOM} \ge I_{1H}; \tag{1.3.3}$$

Параметры:

- номинальный ток 550 А;
- индуктивность 1.73 Гн;
- активное сопротивление –1,08 Ом

Расчет общего сопротивления цепи.

$$R_{0} = 2 \cdot R_{\phi,AJ} + R_{\gamma_{H}} + R_{\gamma_{R}} + 2 \cdot R_{TOP}; \qquad (1.3.4)$$

где *Rтор* – активное сопротивление токоограничивающего реактора;

 $R_{\gamma \mu}$ – коммутационное сопротивление инвертора;

 $R_{\gamma B}$ - коммутационное сопротивление выпрямителя;

 R_{AP} – активное сопротивление дросселя;

RФ.*АД* – активное сопротивление фазы синхронного двигателя.

Активное сопротивление токоограничивающего реактора:

*R*тор=1,08 Ом;

Активное сопротивление фазы асинхронного двигателя:

RФ.АД=0,737 Ом;

Коммутационное сопротивление выпрямителя определим по формуле:

$$R_{\gamma_B} = \frac{m \cdot X_{TOP}}{2 \cdot \pi}; \tag{1.3.5}$$

где m – пульсность схемы (m = 6);

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

$$X_{TOP} = 2 \cdot \pi \cdot f_C \cdot L_{TOP}; \qquad (1.3.6)$$

где f_c – частота питающей сети;

 L_{TOP} – индуктивность токоограничивающего реактора.

Тогда:

$$X_{TOP} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} = 0,0543$$
 Om;

$$R_{\gamma_B} = \frac{6 \cdot 0.0543}{2 \cdot \pi} = 0.052$$
 Om.

Коммутационное сопротивление инвертора:

$$R_{\gamma_{II}} = \frac{m \cdot X_C}{2 \cdot \pi}; \tag{1.3.7}$$

где X_c – сверхпереходное сопротивление асинхронного двигателя:

$$X_{C} = \frac{U_{1\phi}}{\lambda_{i} \cdot I_{1H}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5, 5 \cdot 59} = 0,676 \text{ OM};$$

$$R_{\gamma_{H}} = \frac{6 \cdot 0,676}{2 \cdot \pi} = 0,649 \text{ OM}$$

$$R_{0} = 2 \cdot 1,08 + 0,052 + 0,676 + 2 \cdot 0,737 = 4,36 \text{ OM}.$$

$$L_{0} = 2 \cdot L_{\phi,A\mathcal{I}} + 2 \cdot L_{TOP};$$
(1.3.8)

где *L*Ф.АД – индуктивное сопротивление фазы синхронного двигателя;

Lтор – индуктивное сопротивление токоограничивающего реактора.

 $L_{\phi.AII} = 0,128$ Гн;

$$L_0 = 2 \cdot 0,128 + 2 \cdot 0,000173 = 0,256$$
 Гн.

Расчет электромеханической и электромагнитной

постоянных времени.

Электромагнитная постоянная времени:

$$T_{\mathcal{P}} = \frac{L_0}{R_0} = \frac{0.256}{4.36} = 0.058 \text{ c};$$
 (1.3.9)

Коэффициент момента двигателя:

$$k_{M} = \frac{M_{H}}{I_{H} \frac{\pi}{\sqrt{6}}} = \frac{1305}{59 \cdot 1,28} = 17,28 \text{ H } \text{m/A}; \tag{1.3.10}$$

Коэффициент ЭДС:

$$k_E = \frac{U_{\mu} \frac{3\sqrt{2}}{\pi}}{\omega_0} = \frac{6000 \cdot 1.35}{105} = 77,14 \text{ B c/pag};$$
 (1.3.11)

Коэффициент передачи двигателя по управлению:

$$k_{\mathcal{A}} = \frac{1}{k_E} = \frac{1}{77,14} = 0,012 \text{ pag/B c;}$$
 (1.3.12)

Механическая постоянная времени:

$$T_{M} = \frac{J_{0}R_{0}}{k_{E}k_{M}} = \frac{107 \cdot 4,36}{17,28 \cdot 77,14} = 0,35 \,\mathrm{c};$$
(1.3.13)

Коэффициент усиления тиристорного преобразователя:

$$U_d = U_{d\max} \cdot \cos\alpha; \tag{1.3.14}$$

$$U_{d \max} = U_{2Amp} \cdot 1,35$$
;(1.2.15)

$$K_{mn} = \frac{\Delta U_d}{\Delta U_y} = \frac{380,295 - 220,235}{3,978 - 2,2} = 90$$
(1.3.16)

Расчет статических и динамических характеристик разомкнутой системы.

Определим погрешность регулирования, исходя из основного уравнения динамики:

$$\omega = \frac{U_{\rm n}}{K_{\rm e}} - \frac{M_{\rm n}R_{\rm 0}}{K_{\rm e}K_{\rm m}} = \omega_{\rm 0} - \Delta\omega; \qquad (1.3.17)$$

Рассмотрим два случая:

1) M=0:

$$\omega_0 = \frac{U_d}{k_E} = \frac{6000}{77,14} = 77.8 \text{ рад/с;}$$
 (1.3.18)

2) M=M_н:

$$\Delta \omega = \frac{M_H R_0}{k_E k_M} = \frac{1305 \cdot 4,36}{77,14 \cdot 17,28} = 4,3 \text{ pag/c}; \tag{1.3.19}$$

Статизм характеристик:

верхней:

$$\Delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{4.3}{77.8} \cdot 100\% = 5.5\%;$$
(1.3.20)

нижней:

$$\Delta^* = \frac{\Delta\omega \cdot D}{\omega_0} \cdot 100\% = \frac{4.3 \cdot 7}{77.8} \cdot 100\% = 38,7\%;$$
(1.3.21)

где D=7 – диапазон регулирования.

Составим структурная схему для моделирования разомкнутой системы:



Рис.1.6. Структурная схема разомкнутой системы

В результате моделирования были получены такие графики:



Рис.1.7. Переходной процесс по току в разомкнутой системе



Рис.1.8. Переходной процесс по скорости в разомкнутой системе

Расчет замкнутой системы по схеме с общим сумматором.

Расчет жесткой обратной связи по скорости.

Ke U3 R₀ $1/R_0$ W H91 KΠ ТмКер Ts-p+1 Ud JV UOCT Uocc Ic H₃₂ Кдт Кост Кзу Кдн Ктг

Структурная схема замкнутой системы приведена на рис.1.9.

Рис.1.9. 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, с параметрами:

- номинальное напряжение 230B;

- номинальный ток якоря 0,2А;
- номинальная скорость 1000 об/мин;
- ток возбуждения 0,35 А;
- *R*_я=42,3 Ом;
- *R*_{ов}=127 Ом.

Тахогенератор был выбран с учетом условия:

$$\omega_{\mu\nu} \ge \omega_{\mu\lambda}. \tag{1.3.22}$$

Коэффициент усиления тахогенератора:

$$K_{me} = \frac{U_{TT}}{\omega_{TT}} = \frac{230}{105} = 2,19 \text{ Bc/pad};$$
 (1.3.23)

Требуемый коэффициент усиления замкнутой системы:

$$K_{mp} = \frac{\Delta_p \cdot D}{\Delta_s^*} - 1 = \frac{10, 5 \cdot 7}{3} - 1 = 23, 5 \text{ A.}$$
(1.3.24)

Коэффициент делителя напряжения:

$$K_{\partial H} = \frac{K_{mp}}{K_{mn} \cdot K_{\partial} \cdot K_{me}} = \frac{23,5}{90 \cdot 0,204 \cdot 2,19} = 0,585;$$
(1.3.25)

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

$$R_{\mathcal{A}H} \ge \frac{U_{TT}}{I_{TT}} = \frac{230}{0,2} = 1150 \text{ Om};$$
(1.3.26)

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

$$r_{\partial H} = R_{\mathcal{A}H} K_{\mathcal{A}H} = 1200 \cdot 0,585 = 702 \text{ Om.}$$
(1.3.27)

Ограничение форсировок замкнутой системы.

Коэффициент усиления системы по управляющему воздействию:

$$K_{3}^{\mathcal{Y}\mathcal{B}} = \frac{K_{mn}K_{\partial}}{1 + K_{mn}K_{\partial}K_{m2}K_{\partial H}} = \frac{90 \cdot 0.204}{1 + 90 \cdot 0.204 \cdot 2.19 \cdot 0.585} = 0.749;$$
(1.3.28)

Напряжение задания замкнутой системы:

$$U_{_{3_{xc}}} = \frac{\omega_0}{K_{_3}^{_{y_6}}} = \frac{77.8}{0.749} = 103.87 \,\mathrm{B};$$
(1.3.29)

Напряжение задания разомкнутой системы:

$$U_{_{_{3_{pc}}}} = \frac{\omega_0}{K_{_{mn}}K_{_{\partial}}} = \frac{77.8}{90 \cdot 0.204} = 4.24 \,\mathrm{B};$$
(1.3.30)

Коэффициент форсировки по напряжению:

$$K_{\phi opc} = \frac{U_{_{3_{xc}}}}{U_{_{3_{pc}}}} = \frac{103,87}{4,24} = 24,5.$$
(1.3.31)

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:

$$U_{ynp \max} \le K_{\phi opc. \partial on} \cdot U_{3_{3C}} = 2 \cdot 4,24 = 8,48 \text{ B}.$$

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.1.10.



Рис.1.10. Общий вид датчика тока

Найдем коэффициент усиления датчика тока:

$$K_{\partial m} = \frac{U_A}{I_{\text{max}}} = \frac{10}{20,6} = 0,485 \,\text{B/A},$$
 (1.3.32)

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

Выбираем ток отсечки и ток упора.

$$I_{omc} = 1, 2I_{Hd} = 1, 2 \cdot 10, 3 = 12, 36 \text{ A};$$
 (1.3.33)

 $I_{\nu n} = 2I_{n\partial} = 2.10, 3 = 20, 6$ A. (1.3.34)

Расчет уставки нечувствительности нелинейного элемента включенного на выход ДТ:

$$U_{02} = I_{omc} \cdot K_{\partial m} = 12,36 \cdot 0,485 = 6 \text{ B.}$$
(1.3.35)

НЭ реализуется двумя встречно включенными стабилитронами с напряжением пробоя $U_{npo\delta} = 6$ В.

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

$$U_{ocmTII} = I_{vn} \cdot R_0 = 20,6 \cdot 4,043 = 83,29 \,\mathrm{B}.$$
 (1.3.36)

Соответствующее напряжение на входе электронного усилителя равно:

$$U_{yocm} = \frac{U_{ocmTII}}{K_{mn}} = \frac{83,29}{90} = 0,925 \text{ B.}$$
(1.3.37)

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

$$U_{ocm} = U_{3_{sc}} - U_{yocm} = 10 - 0,925 = 9,075 \text{ B};$$
 (1.3.38)

Приращение выхода датчика тока в период действия токовой отсечки:

$$\Delta U_{\partial m} = (I_{yn} - I_{omc})K_{\partial m} = (20, 6 - 12, 36) \cdot 0,485 = 4 \text{ B};$$
(1.3.39)

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

$$K_{ocm} = \frac{U_{ocm}}{\Delta U_{\partial m}} = \frac{9,075}{4} = 2,269;$$
(1.3.40)

Поскольку *K*_{ocr}>1, значит необходимо в цепь обратной святи по току, после потенциометрического делителя включить электронный усилитель с *Кэу*=10:

$$K_{ocm} = \frac{U_{ocm}}{\Delta U_{\partial m} \cdot K_{y}} = \frac{9,075}{4 \cdot 10} = 0,227; \qquad (1.3.41)$$

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

$$r_{\mathcal{A}H} = R_{\mathcal{A}H} \cdot K_{ocm} = 2,27 \text{ KOm};$$
 (1.3.42)

Определение устойчивости системы

Составим упрощенную структурную схему замкнутой системы:



Рис.1.11. Упрощенная структурная схема замкнутой системы

Передаточная функция по управляющему воздействию:

$$W_{3}^{ye} = \frac{\frac{K_{mn}K_{o}}{(T_{n}p+1)(T_{3}T_{M}p^{2}+T_{M}p+1)}}{1+K_{me}K_{ou}\frac{K_{mn}K_{o}}{(T_{n}p+1)(T_{3}T_{M}p^{2}+T_{M}p+1)}} = \frac{K_{mn}K_{o}}{(T_{n}p+1)(T_{3}T_{M}p^{2}+T_{M}p+1)} = \frac{K_{mn}K_{o}}{T_{3}T_{M}T_{n}p^{3}+p^{2}(T_{M}T_{n}+T_{3}T_{M})+p(T_{n}+T_{M})+(1+K_{me}K_{ou}K_{mn}K_{o})} = (1.3.43)$$
$$= \frac{183.6}{0,0000133p^{3}+0,000483p^{2}+0,045p+24,522}$$

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

Так определитель $\Delta < 0$, то система неустойчива.

Разделим характеристическое уравнение системы на ао:

$$p^3 + 363,158p^2 + 33834,586p + 18437593,98$$

b1=363,158;

b2=33834,586;

b3=18437593,98.

$$M = \frac{b_1}{\sqrt[3]{b_3}} = \frac{363,158}{\sqrt[3]{18437593,98}} = 1,37$$

$$N = \frac{b_2}{\sqrt[3]{b_3^2}} = \frac{33834,586}{\sqrt[3]{18437593,98^2}} = 0,0052$$
(1.3.44)

Коэффициентом передаточной функции по управляющему воздействию при р³ пренебрегаем и разделим её числитель со знаменателем на свободный член знаменателя:

$$W_{_{3}}^{_{y_{8}}} = \frac{183,6}{0,000483p^{2} + 0,045p + 24,522} = \frac{7,487}{0,00002p^{2} + 0,0018p + 1};$$
(1.3.45)

Расчёт системы подчинённого регулирования

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 [3]:

$$K_{\partial m} = \frac{U_a}{I_{dn}} = \frac{10}{10.3} = 0.97 \text{ B/A};$$
 (1.3.46)

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_{\partial c} = \frac{U_a}{\omega_0} = \frac{10}{105} = 0,095 \text{ B c/pag};$$
 (1.3.47)

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

$$W_{om}(p) = \frac{K_{mn}K_{\partial m}}{R_0(T_{\ni}p+1)};$$
(1.3.48)

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

$$W_{pm}^{MO}(p) = \frac{3\mu(o)}{4\mu c\pi(o) \cdot 2T_{\mu}p} = \frac{R_0(T_{\Im}p+1)}{K_{mn}K_{\partial m}2T_{\mu}p} = \frac{4,043 \cdot 0,0038 \cdot p}{90 \cdot 0,97 \cdot 2 \cdot 0,004 \cdot p} + \frac{4,043}{90 \cdot 0,97 \cdot 2 \cdot 0,004 \cdot p} = \frac{5,78}{p} + 0,022$$
(1.3.49)

Регулятор тока имеет пропорционально-интегральную структуру, принципиальная схема реализации имеет вид (рис.1.12):



Рис.1.12. Принципиальная схема регулятора тока.

Значения сопротивлений и емкостей рассчитаны по формулам:

$$\frac{R_0}{R_1} = \Pi;$$
(1.3.50)

$$\frac{1}{R_1 C_0} = U; (1.3.51)$$

$$R_T = R_1;$$
 (1.3.52)

примем Со=1мкФ, тогда:

$$R_1 = R_T = \frac{1}{5,78 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 170 \text{ kOm};$$

 $R_0 = 0,0022 \cdot 170 \cdot 10^3 = 0,374$ кОм,

где R_т – согласующий резистор, если используются элементы с различными унифицированными выходами.

Расчёт обратной связи по скорости и регулятора скорости.

Статизм регулятора скорости, синтезируемого по модульному оптимуму:

$$\Delta_{_{3}}^{*} = \Delta_{_{p}} D \frac{2T_{_{\mu c}}}{T_{_{\mathcal{M}}}} = 10,5 \cdot 7 \cdot \frac{2 \cdot 0,004}{0,035} = 16,8\%.$$
(1.3.53)

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

$$W_{pc}^{co}(p) = \frac{T_{M}K_{E}K_{\partial m}(4T_{\mu c}p+1)}{8T_{\mu c}^{2}R_{0}K_{\partial c}p} = \frac{0.035 \cdot 4.89 \cdot 0.97(4 \cdot 0.004 \cdot p+1)}{8 \cdot 0.004^{2} \cdot 4.043 \cdot 0.095 \cdot p} = 53.69 + \frac{3356.13}{p}; (1.3.54)$$

Передаточная функция фильтра, устанавливаемого на вход системы:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{4T_{\mu\nu}p+1} = \frac{1}{0,016p+1}.$$
(1.3.55)

Принципиальная схема регулятора скорости представлена на рис.1.13.



Рис1.13. Принципиальная схема регулятора скорости

Коэффициенты усиления регулятора:

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

Приняв *СО*=1мкФ и *R1=Rф* получим

$$R_1 = \frac{1}{3356, 13 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 297,96 \,\mathrm{Om};$$

$$R_0 = 297,96 \cdot 53,69 = 16$$
 кОм;

$$C_{\phi} = 45 \, \pi \Phi.$$

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).

$$\Delta t = \frac{J_0 \omega_0}{2I_{\mu} K_{\mu}} = \frac{0.2 \cdot 105}{2 \cdot 10.3 \cdot 4.7} = 0.22 \text{ сек.}$$
(1.3.56)

Составление структурной схемы.

Структурная схема системы подчиненного регулирования будет иметь вид показанный на рис.1.14.



Рис.1.14. Структурная схема замкнутой системы подчиненного

регулирования.

Переходные процессы в системе подчиненного регулирования будут иметь вид:



Рис.1.15. Переходной процесс по скорости в системе с подчиненным

регулированием.



Рис.1.16. Переходной процесс по току в системе с подчиненным

регулированием.

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.1.17. Принципиальная схема привода.

АД имеет параметры: Рн=450 кВт. К системе были предъявлены следующие требования:

- статизм на нижней характеристике регулирования: $\Delta^* \le 3\%$;
- перерегулирование: δ 6%;
- время регулирования: t_p=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: In/Iн=10;

время регулирования: t_P=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: I_п/I_н=1,2;
- время регулирования: t_p=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_{μ} . 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.

66

1.4. Трансвекторное управление АД (FOC).

Как известно, полная управляемость электропривода обеспечивается, если обеспечивается управление электромагнитным моментом двигателя. Во всех электромеханических преобразователях вращающий момент образуется в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора или, что то же самое, магнитного поля одного элемента и тока другого. Для получения однозначных функций управления обе величины должны быть независимы друг от друга, и тогда одну из них можно поддерживать постоянной, а с помощью другой осуществлять регулирование. В ДПТ и синхронных двигателях существуют отдельные электрические цепи для управления магнитным потоком и моментом. В короткозамкнутых АД есть только один канал, в котором объеденены обе составляющие тока и в задачу системы управления входит функция их разделения. Математически эта задача элементарно решается при использовании уравнений обощенной электрической машины в векторной форме. В результате выбора пары векторов величин образующих электромагнитный момент и системы координат, в которой они представлены, можно получить уравнение момента в виде функции независимых проекции этих величин на координатные оси. И тогда управление моментом сведется к управлению проекциями векторов. Отсюда происходит название способа – трансвекторное управление или fieldoriented control (FOC).

67



Рис.1.19. Структурная схема модели системы векторного управления в осях 🕼 – 🕅

Здесь трехфазный АД питается от преобразователя частоты, обладающего свойствами источника напряжения. В рабочем зазоре двигателя размещены датчики Холла, с помощью которых измеряются ортогональные составляющие ос новного магнитного потока Ψ_{ma} $\pi \Psi_{mg}$. В двухфазах статора установлены также датчики тока, сигналы которых t_{1a}, t_{1b} затем преобразуются (3/2) в ортогональные проекции вектора тока статора в неподвижной системе координат $t_{1a}^{(add)}$.

С помощью полученных проекций векторов тока (^(ай) статора и потокосцепления в **W**^(ай) зазоре в блоке преобразования потока (ПП) вычисляется потокосцеплением ротора в неподвижной системе координат в соответствии с выражением

$$\Psi_{2}^{(\alpha\beta)} = \Psi_{m}^{(\alpha\beta)} \frac{L_{2}}{L_{m}} - i_{1}^{(\alpha\beta)} L_{1\sigma} \Rightarrow \Psi_{2\alpha} = \Psi_{m\alpha} \frac{L_{2}}{L_{m}} - i_{1\alpha} L_{1\sigma} \quad \Psi_{2\beta} = \Psi_{m\beta} \frac{L_{2}}{L_{m}} - i_{1\beta} L_{1\sigma} (1.4)$$
.1.)

Затем с помощью так называемого вектора-фильтра (ВФ) (рис.1.17) вычисляются модуль потокосцепления ротора $|\Psi_2| = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}$ и тригонометрические функции, определяющие текущее попложение синхронной системы координат в пространстве - $\cos \vartheta_1 = \Psi_{2\alpha} / |\Psi_2|$; $stn \vartheta_1 = \Psi_{2\beta} / |\Psi_2|$. Таким образом, с помощью описанных блоков формируются сигналы, обеспечивающие переход от неподвижной системы координат к синхронной и наоборот. Последним этапом преобразования величин, полученных измерением (истинных величин), является вычисление продольной и поперечной составляющих тока статора t_{1d} , t_{1a} с помощью ротатора ($\alpha\beta/dq$). Структура ротатора показана на рис. Изменение знака синусной функции приводит к изменению направления вращения, т.е. преобразования $a\beta/dq$ изменяется на противоположное $dq/\alpha\beta$.

Система управления рис имеет два независимых внешних контура обратных связей: по скорости вращения и по потокосцеплению ротора и два

подчиненных контура по составляющим тока статора, образующим вместе отрицательную связь по вектору тока. Информация о частоте вращения поступает с выхода датчика скорости (ДС)(рис.1.20). После вычитания из сигнала задания ω^* , полученный сигнал ошибки подается на регулятор скорости (РС), на выходе которого формируется сигнал задания момента m^* , а затем, после деления на величину модуля $[\Psi_a]$, сигнал задания поперечной составляющей тока статора t_{1a}^* . Стабилизация потокосцепления осуществляется с помощью регулятора потока (РП), формирующего сигнал задания продольной составляющей тока статора t_{1a}^* . Преобразователь частоты (ПЧ), питающий статор АД, управляется сигналами задания фазных напряжений $u_1^{(a***)*}$, но, будучи охваченным отрицательной обратной связью по току статора, работает в режиме источника тока. Блок развязки координат (БР) (рис.1.19) можно построить на основе уравнений модели АД, управляемого напряжением (). В них можно положить $d\psi_{2d}/dt \approx 0$ и $\omega_1 \approx \omega$. Тогда, с учетом того, что $\psi_{2d} = |\Psi_2|_1 u_{d0}^* = t_{1d} u_{q0}^* = t_{1q}$, уравнения БР будут иметь вид

$u_{1d} = u_{d0}^* r_1 (1 + T_1' p) - u_{g0}^* \omega L_1'$	(1.4.2)
-------------------------------------------------------------	---------

$$u_{1q} = u_{q0}^* r_1 (1 + T_1 p) + u_{d0}^* \omega L_1' + \omega |\Psi_2| k_2$$
(1.4.3.)

представленный в виде структурной схемы на рис.1.22.

Таблица 1.8.

Физический Параметр	Базисная Величина	Выражения для базисной величины	Числовое значение параметра $Y^{*} = \frac{Y}{T_{\delta}},$ o.e.
Напряжение	Номинальное амплитудное значение фазного напряжения	$u_{d} = \sqrt{2} U_{discon}$	$U^*_{SMHON} = 1$
Ток	Номинальное амплитудное значение фазного напряжения	$l_{o} = \sqrt{2} l_{\phi How}$	$I^*_{smhow} = 1$
Сопротивление	Отношение фазного напряжения к	$r_{\sigma} = x_{\sigma} = \frac{u_{\sigma}}{t_{\sigma}}$	$R_{s}^{*} = 0.05$

70

	фазному току		$R_{r}^{*} = 0,036$
			$X_m^* = 3/8$
			$X_{s}^{*} = 3,854$
			$X_{p}^{\ast}=3.91$
	Синхронная		
	частота вращения		
	поля статора при		
Частота Вращения	номинальной	$\omega_{d} = \omega_{0hom}$	$\omega_0^r = 1$
	частоте		
	преобразователя		
	частоты		
	Время поворота		
_	вектора,	. 1	
Время	вращающегося с	Corrow (Million	$\omega^* = 314$
	частотой вращения		
	‰ ₀, на 1 радиан		
	Отношение фазного		
Потокосцепление	напряжения к	$\Psi_{\alpha} = \frac{u_{\alpha}}{2}$	$\Psi^*_{mmax} = 1$
monoeqenseme	синхронной частоте	ω_{6}	r mana
	вращения		
	Отношение		
	потокосцепления к		$L_{m}^{\circ} = 3.6$
	току или	. Wa 8a	-776 -7-
Индуктивность	индуктивного	$L_0 = \frac{1}{10} = \frac{1}{10}$	$L_{g}^{*} = 3,854$
	сопротивления к	- <u>-</u>	$i_{-}^{*} = 3.91$
	синхронной частоте		• p - • l • •
	вращение		

Полученный на выходе БР вектор заданного напряжения статора $u_1^{(dq)*}$, преобразуется далее ротатором $dq/a\beta$ в неподвижную систему координат $u_1^{(a\beta)*}$, а затем разделяется на фазные проекции $u_1^{(abo)*}$, которые являются сигналами управления для ПЧ. В системе трансвекторного управления (рис.1.16) в качестве входных сигналов использовались фазные токи и ЭДС датчиков Холла [3], измеряющих магнитный поток в зазоре АД. При использовании достаточно мощного процессора для обработки информации можно отказаться от датчиков магнитного потока и вычислять потокосцепление ротора, пользуясь уравнениями статора и потокосцеплений в неподвижной системе координат.







Рис.1.22. Структурная схема блока развязки.



Рис.1.21. Структурная схема устройства идентификации потокосцепленияротора



Рис. 1.23. Структурная схема устройства индентификации частоты вращения АД.

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = u_1 - t_1 r_1; \ \Psi_2 = (\Psi_1 - t_1 \sigma L_m/k_1)/k_2$$
 (1.4.4)
где $k_1 = L_m/L_1; \ k_2 = L_m/L_2; \ \sigma = 1 - k_1 k_2$ – соответственно коэффициенты
электромагнитной связи статора и ротора и коэффициент рассеяния. В
результате потокосцепление ротора будет определяться по мгновенным
значениям напряжения и тока статора так, как это показано на структурной
схеме (рис.1.18).

В данной системе трансвекторного управления не используем датчик скорости, т.к. ее также можно вычислить по легко наблюдаемым фазным напряжениям токам статора.



Рис.1.23. Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением без датчика скорости.

Для этого можно воспользоваться уравнением ротора, записанным в неподвижной системе координат

$$t_2^{(\alpha\beta)}r_2 + \frac{d\Psi_2^{(\alpha\beta)}}{dz} - j\omega\Psi_2^{(\alpha\beta)} = 0$$

Подставляя в это уравнение ток ротора, представленый через ток статора и потокосцепление ротора $t_2^{(\alpha\beta)} = (\Psi_2^{(\alpha\beta)} - t_1^{(\alpha\beta)}L_m)/L_2$, и опуская индексы системы координат, получим

$$\Psi_2(1-j\omega T_2+T_2p)=t_1L_m.$$

И далее, разделяя проекции векторов –

$$\Psi_{2\alpha}(1+T_2p) + \Psi_{2\beta}\,\omega T_2 = t_{1\alpha}L_m \tag{1.4.5}$$

$$\Psi_{2\beta}(1+T_2p) + \Psi_{2\alpha}\omega T_2 = t_{1\beta}L_m. \tag{1.4.6}$$

Для вычисления *w* можно использовать любое из двух уравнений, но в первом из них ток статора представлен *и* – проекцией, т.е. истинным значением тока в фазе *a*. Поэтому для уменьшения погрешности лучше для этой цели выбрать его –

$$\omega - [l_{1\alpha}L_m - \Psi_{2\alpha}(1 + T_2 p)]/\Psi_{2\beta}T_2$$
(1.4.7)

Таким образом, используя проекции вектора тока статора и полученные с помощью выражений (1.4.4) проекции потокосцепления ротора, можно определить угловую частоту вращения ротора АД.

Поскольку каналы регулирования в системе векторного управления разделены, анализ канала регулирования потокосцепления ротора целесообразно производить в режиме короткого замыкания двигателя, а канала регулирования момента и частоты вращения двигателя – в режиме холостого хода, когда электромагнитные переходные процессы в канале регулирования потокосцепления ротора уже завершились.

В режиме короткого замыкания двигателя частота вращения •• • •, а следовательно, электромагнитный момент асинхронного двигателя также равен нулю. Это возможно только в том случае, если пространственный угол у между осью « и вектором потокосцепления ротора равен нулю, то есть:

cosy = 1; stay = 0.

Тогда для составляющих переменных состояния асинхронного двигателя по оси а справедливы следующие соотношения:

$$U_{s\alpha} = U_{s1} = U_{sm};$$

$$t_{s\alpha} = t_{s1} = t_{sm};$$

$$\Psi_{r\alpha} = \Psi_{rm}.$$

а по оси *в* составляющие напряжения, тока статора и потокосцепления ротора равны нулю. При этих условиях канал регулирования
потокосцепления ротора асинхронного двигателя описывается линейной системой уравнений (смотреть главу 1.2):

$$\begin{split} t_{om} &= \frac{\frac{4}{R_s}(T_r p + 1)}{\sigma T_s T_r p^2 + (T_s + T_r) p + 1} U_{om} \\ \Psi_{rm} &= \frac{L_m}{T_r p + 1} t_{om'} \end{split}$$

где $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ - электромагнитная постоянная времени статорной цепи двигателя,

двигателя,

 $T_r = \frac{L_r}{R_F}$ - электромагнитная постоянная времени роторной цепи двигателя.

Линеаризованная структурная схема канала регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя в общем виде выглядет следующим образом:



Рис.1.24. Линейная структурная схема канала регулирования потокосцепления ротора двигателя в системе векторного управления.

На схеме обозначено:

- - регулятор потокосцепления ротора двигателя;
- регулятор составляющей тока статора двигателя i_{s1}
- коэффициент усиления преобразователя частоты;
- коэффициент усиления датчика составляющей тока двигателя *i*_м;
- - коэффициент усиления датчика потокосцепления ротора двигателя.

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. линейных системах Такой режим не возможен В И поэтому 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

76

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 ω . 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 трения покоя и движения, причем если при $\frac{\partial \varphi}{\partial t}\Big|_{x=t_1} = 0$ момент трения $M = M^*$, то при $\frac{\partial \varphi}{\partial t}\Big|_{x=t_1} \neq 0$ $M = \beta M^*$, где $\beta < 1$. Задача о крутильных колебаниях колонны бурильных труб имеет вид [2]

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

$$(2.1.1) \\ \varphi(x, t)_{t=0} &= 0; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{t=0} &= 0 \end{aligned}$$

где φ – 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; ν – 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)

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

$$\begin{cases} \frac{d\overline{\varphi}_{n}}{d\overline{t}} = e(S_{n})S_{n}(\overline{\varphi}_{x}, M) \\ S_{n}(\overline{\varphi}_{x}, M) = \chi_{1} \int_{0}^{t} \left[-(\overline{\varphi}_{n} - \overline{\varphi}_{n-1}) - \chi_{2}e\left(\frac{d\overline{\varphi}_{n}}{dt}\right) \right] dt \\ e(S_{n}) = \begin{cases} 0, S_{n} \leq 0 \\ 1, S_{n} > 0 \\ 1, S_{n} > 0 \end{cases} \end{cases}$$
(2.1.4)
$$e_{1}\left(\frac{d\overline{\varphi}_{n}}{dt}\right) = \begin{cases} 1, \frac{d\overline{\varphi}_{n}}{d\overline{t}} = 0 \\ \beta < 1, \frac{d\overline{\varphi}_{n}}{d\overline{t}} \neq 0 \end{cases}$$

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

$$\chi = \frac{1}{n} \chi^*; \chi_1 = \frac{1}{n} \chi_1^*; \chi^* = \frac{2\mathcal{U}_1}{a};$$

$$\chi_1^* = \frac{GI_0 l_1}{I_2 a^2}; \chi_2 = \frac{M^* a}{GI_0 \omega_0}; M_1 = \frac{l_1 \omega_0}{an}; M_2 = \frac{l_1}{an}$$
(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. Блок-схема моделирования с помощью програмного расширения Simulink.

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 χ_1^* и χ_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:- $x=0.1; x_1=2; x_2=1;$ $M_y=955 \ H\cdot m$ $M = 477.5000 H \cdot M$ $G = 8.0000e+010 H / M^2$ $I_0 = 8.9100e-006 H \cdot M \cdot c^2$ 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} .





б) зависимость угла поворота нижнего сечения колонны от времени $\varphi(t)$.

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 χ_1 и χ_2 можно добиться, чтобы снизить или вообще погасить автоколебания (рис.2.1.3).

82



Рис.2.1.3. Зависимость максимального тангенциального напряжения в

забойной части колонны $\frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial x}$ 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; ρ - 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)

 δ - глубина погружения зубьев в породу, β_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 $u_0(k)$:

$$\begin{aligned} a^{2} \frac{d^{2} u_{0}(x)}{dx^{2}} &= 0, \end{aligned} (2.2.9) \\ EF \frac{\partial u_{0}(x)}{\partial x}|_{x=0} - cu_{0}(x)|_{x=0} &= 0, \end{aligned} (2.2.10) \\ u_{0}(x)|_{x=l} &= \frac{a_{0}}{2}. \end{aligned} (2.2.11) \\ H v(x,t): \\ m_{1} \frac{\partial^{2} v(x,t)}{\partial t^{2}}|_{x=0} &= EF \frac{\partial v(x,t)}{\partial x}|_{x=0} - cv(x,t)|_{x=0}, \end{aligned} (2.2.12) \\ \frac{\partial^{2} v}{\partial t^{2}} &= a^{2} \frac{\partial^{2} v}{\partial x^{2}} - 2h \frac{\partial v}{\partial t}, 0 \langle x \langle l, t \rangle - \infty, \end{aligned} (2.2.13) \\ v(x,t)|_{x=l} &= \sum_{n=1}^{\infty} \overline{A_{n}} \cos \frac{nNwt}{2}, t \rangle - \infty. \end{aligned}$$
 (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)

$$u(x,t) = \frac{a_0}{2l\left(\frac{EF}{cl} + 1\right)} \left(x + \frac{EF}{c}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\overline{A}_n \left(N_{1n} \cos \frac{nNwt}{2} - N_{2n} \sin \frac{nNwt}{2}\right)}{M_{3n}^2 + M_{4n}^2},$$

(2.2.15)

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

$$\beta_n = 0, b_n = \sqrt{\alpha_n} = \frac{nNw}{2a}; \alpha_n = 0, \text{ тогда (2.2.15) примет вид:}$$
$$u(x,t) = \frac{a_0}{2l\left(\frac{EF}{cl} + 1\right)} \left(x + \frac{EF}{c}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\overline{A}_n (b_n \cos b_n x + \gamma_n \sin b_n x) \cos \frac{nNwt}{2}}{(b_n \cos b_n l + \gamma_n \sin b_n l)}$$
(2.2.16)

(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:

 $l = 5000 \ m$ - длина КБТ; $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па – 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; $\rho = 10^3 \kappa c / M^2$ - 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.

% программа

% исходные данные

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

```
\label{eq:A=-4} 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);

 $M2n = -dn^* cos(bn^*x)^* cosh(dn^*x) + bn^* sin(bn^*x)^* sinh(dn^*x) - bn^* sin(bn^*x)^* sin(bn^*x) - bn^* sin(bn^*x)^* sin(bn^*x) - bn^* sin(bn^*x)^* sin(bn^*x) - bn^* sin(b$

```
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) - 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);
```

 $u=a0/(2^{l}(E^{F}/(c^{1})+1))^{(x+E^{F}/c)+s1};$

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:

%программа

%исходные данные

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 $n_{u} = 3 - 606 / Muh$. 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.

92



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 Δx , и верхней граничной частотой ω моделирования сплошной линии дискретной цепочкой:

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

93

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 Δx . 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

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

Отсюда

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

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

Таким образом, погрешность формулы для центральной разности, представленной выражением (2.3.4) при малом Δx , имеет порядок Δx^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 Δx :

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

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:

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

$$\varepsilon = -\frac{\Delta x^2}{12} \frac{d^4 u}{dx^4} \Big|_i - \dots,$$
(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 Δx коэффициент α_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 уравнени

2.4. Метод электромеханической аналогии.

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 Δx в промежутке времени Δt . 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 Δx и Δt 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)
где $a^2 = \frac{1}{LC}; 2h = \frac{R}{L}; u = I.$

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 электромеханической аналогии, 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:

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

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

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

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 ω_0 и при увеличении осевой нагрузки на забой происходит скачкообразное возрастание момента на долоте на величину ΔM . 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 Δx 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 θ существует следующая зависимость:

$$M = -J_0 G \frac{\partial \theta}{\partial x},$$

(2.5.2)

где *G* - модуль сдвига; *J*₀ - 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 $J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = J_0 G \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - B \frac{\partial}{\partial t} \theta,$ (2.5.3) Граничные условия для (3)

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

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

Начальный угол закручивания колонны определяется из решения уравнения

$$J_{0}G\frac{\partial^{2}\theta}{\partial x^{2}}-B\omega_{0}=0,$$

(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:

$$\left. \theta \right|_{x=0} = 0$$
,

При выполнении этих условий определяются ${\it C}_1$ и ${\it C}_2$, после чего получается

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

Как было отмечено выше, второе начальное условие будет

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

(2.5.8)

Для упрощения дальнейшей записи θ представляется в виде суммы двух функций:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2$$

,

(2.5.9)

где θ_2 подбирается так, чтобы условия (2.5.4), (2.5.7) и (2.5.8) для функции θ_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 θ_2 из формулы (2.5.10) в выражение (2.5.9), а значение θ из (2.5.9) в уравнения (2.5.3), (2.5.4) и (2.5.5), для θ_1 получается

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

(2.5.11)

С граничными условиями

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t}\Big|_{x=0} = 0,$$

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

(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 ω и М определяются соответственно выражениями

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

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

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

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

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

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

Подставляя выражение (2.5.24) в (2.5.23), получаем

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

$$(2.5.24)$$

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.

Определение напряжений при крутильных колебаниях колонны бурильных

труб.

Для исследования динамики вращательного движения колонны труб принимается схема:



Рис. 2.5.1.

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:

$$I_{1}\frac{d^{2}\varphi_{1}}{dt^{2}} = M_{1} + J_{0}G\frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=0} - H_{1}\frac{d\varphi_{1}}{dt}$$
(2.5.27)

для колонны бурильных труб:

$$\frac{d^{2}\varphi}{dt^{2}} = a^{2-} \frac{d^{2}\varphi}{dx^{2}} - 2h \frac{d\varphi}{dt}$$
(2.5.28)

для утяжеленного низа:

г

$$I_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = -M_2 - J_0 G \frac{d\varphi}{dx}\Big|_{x=l} - H_2 \frac{d\varphi_2}{dt}$$

(2.5.29),

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*₁,*H*₂,*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:

$$P(x,t) = \frac{M_{1,2}a^{2}}{l^{2}} \left[\frac{1}{h^{2}(1+\alpha)} - \frac{(ht+1)e^{-ht}}{h^{2}(1+\alpha)} - 2e^{-ht} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha l \cos \gamma_{n} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \left(h \sin \frac{\gamma_{n}at}{l} + \frac{\gamma_{n}a}{l} \cos \frac{\gamma_{n}at}{l}\right)}{a\gamma_{n} \left(\alpha + \alpha^{2} + \gamma_{n}^{2}\right) \left[h^{2} + \left(\frac{\gamma_{n}a}{l}\right)^{2}\right] \cos \gamma_{n}} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha \cos \gamma_{n} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\left(\alpha + \alpha^{2} + \gamma_{n}^{2}\right) \left[h^{2} + \left(\frac{\gamma_{n}a}{l}\right)^{2}\right] \cos \gamma_{n}} \right]$$
(2.5.30)

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

$$\tau = GR \frac{\partial \varphi}{\partial x} \tag{2.5.31}$$

Окончательно получается выражение для напряжения в бурильной колонне:

$$\tau(x,t) = -2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{GRM_{1,2}a^{2}\alpha\gamma_{n}\sin\gamma_{n}\left(1-\frac{x}{l}\right)}{l^{2}\left(\alpha+\alpha^{2}+\gamma_{n}^{2}\right)\left[h^{2}+\left(\frac{\gamma_{n}a}{l}\right)^{2}\right]\cos\gamma_{n}} - 2e^{-ht}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{GRM_{1,2}a\ \alpha\gamma_{n}\sin\gamma_{n}\left(1-\frac{x}{l}\right)\left(h\sin\frac{\gamma_{n}at}{l}+\frac{\gamma_{n}a}{l}\cos\frac{\gamma_{n}at}{l}\right)}{l^{2}\left(\alpha+\alpha^{2}+\gamma_{n}^{2}\right)\left[h^{2}+\left(\frac{\gamma_{n}a}{l}\right)^{2}\right]\cos\gamma}$$
(2.5.32)

В выражения (2.5.31) и (2.5.32) 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*₁ - приведенный момент инерции:

$$I_1 = Il_1$$

 ${\cal I}_2$ -момент инерции утяжеленных бурильных труб:

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

*I*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. 2.5.2

 $I_{1}=356;$ l=5000; $J_{0}=891*10^{8}$ $G=8*10^{10};$ $I_{2}=16.7;$ $I=712*10^{(-4)};$ $M_{1}=150;$ $M_{2}=320;$ 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];









Рис.2.5.2. Зависимости $\varphi(x,t)$ при различных x (графики напряжений крутильных колебаний КБТ в разных сечения колонны).

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 β , что приводит к уменьшению τ . С увеличением же момента инерции колонны бурильных труб, т.е. с уменьшением β , напряжение, естественно, возрастает. Заметим также как происходит затухание колебаний из-за трения между колонной бурильных труб и глинистым раствором.

Глава 2.6. 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 С сосредоточенными параметрами может существенно 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 2.6.1. Принципиальная схема для расчета КБТ.

Для элемента бурильной колонны длиной Δx , (рис2.6.1) при пренебрежении ее деформацией за время Δt , 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 Δx , за время Δt , 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 (2.6.1) и (2.6.2) 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

$$\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 i \tag{2.6.3}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}$$
(2.6.4)

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

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t} + \frac{h_0}{J_0} \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{J_0 e_0} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
(2.6.5);

или в электрических величинах

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + \frac{R_0}{L_0} \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{J_0 c_0} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$$
(2.6.6)

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:

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

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

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

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

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

$$\frac{d\overline{M}_{n}}{d\tau} = \alpha_{n} \left(\overline{M}_{n} - \overline{M}_{A} \right) - \beta_{n} \overline{\omega_{A}}$$
(2.6.7)

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

Для решения системы уравнений (2.6.7) применены два способа. Один заключается в применении визуального програмирования с использованием приложения Simulink, системы Matlab. Составляется блочная модель буровой колонны (рис.2.6.2.), позволяющая менять число *n*. Параметры блоков, входящих в систему (2.7.7), а именно, α_i , β_i и γ_i , рассчитываются по формулам:

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

*m*_w,*m*_M,*m*_t - 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. 2.6.2. Блок-схема модели буровой колонны при $M_{don} = 426,9$ и n=4.

Структура модели дает возможность наблюдать решение системы (2.6.7) на осциллоскопе, причем можно наблюдать как кончные величины: ω_{∂} и M_n , так и промежуточные ω_i (i = 1, ..., n - 1). Были проведены эксперименты для разных значений $M_{\partial e}$, M_{∂} и n.

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

Наименование параметра	Величина и
	размерность
Номинальная мощность, Р _н	450 кВт
Номинальное питающее напряжение, U _н	380 B
Частота вращения ротора, пном	750об/мин
Номинальный ток статора, I1н	812 A
Момент инерции двигателя, J	18,26 кг·м ²

Значения параметров, внесенные в таблицу, вводятся в систему Matlab, рассчитываются другие, среди них $M_{_{\partial 6}}$ и $M_{_{\partial o 7}}$

pn=250;

un=330;

>> in=812;

>> 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.2.6.2) и проводятся эксперименты для разных значений M_{don} и *п*.Результаты приведены на рис. 2.6.3.



Рис.2.6.3. Зависимость ω_i от t при n=5 и $M_{\partial on} = 426,9$



Рис.2.6.4. Зависимости
 $\varpi_{\scriptscriptstyle i}$ от $t\,$ при различных значения
х $M_{\scriptscriptstyle don}$



Рис. 2.6.5. Блок-схема модели буровой колонны при $M_{don} = 426,9$ и n=7.



Рис. 2.6.6. Зависимость ω_i от *t* при *n* =7 $M_{\partial o n} = 426,9$

Второй способ состоит в аналитическом решении системы (2.6.7) в системе Matlab. Была составлена программа для n=14, в которую входят два файла: script-file, file-function.

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

```
gama=[0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.1 99];
```

```
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)-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=[0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.098,0.1
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)>=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')

 ω_i



а) при *n* =13;



б) при *n* =11;

Рис. 2.6.7. Зависимость ω_i от *t* при различных значениях *n*.

На рис.2.6.7(а,б) представлены наложенные друг на друга осциллоскопы переходных процессов пуска КБТ. Кривые $\omega_{ycm,\partial e}$ и $\omega_{13,ycm}$, $\omega_{11,ycm}$, изображающие соответственно скорость колонны в устье скважины и скорость долота, n = 13 и 11 для КБТ длиной l = 5500 м и d = 114 мм.

Как видно, модели соответствующие n = 13 и 11, практически одинаково отображают переходный процесс пуска КБТ. Однако, в одном случае при n = 13, долото начинает вращаться спустя 1,7с после подачи на колонну скачкообразного момента, а в другом - при n = 11 начинает воащаться спустя 1,4с, что подтверждает правильность построения модели и полностью согласуется с теоретическим расчетом:

$$t_{3an} = \frac{l}{C_n} = \frac{5500}{3300} = 1.7c$$
,

где $C_n = 3300 \, m/c$ - скорость распространения поперечных волн в стальных трубах. Разность же амплитудных значений скорости при n = 11 и n = 13 не превышает 5%.

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.

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

Составим блок-схему в системе Simulink, которая связывает КБТ с асинхронным двигателем (рис.4.1). Схема позволяет рассмотреть графически поведение колонны и двигателя при бурении на глубину 5000 м.



Рис.3.1. Блок-схема связи КБТ и схемы электропривода.

3.1 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:

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

Для системы Г-Д:

 $M_{\partial e}(t), \omega_{\partial e}(t)$ - момент, развиваемый двигателем и его скорость вращения;

 $e_r(t)$ - ЭДС генератора, питающего двигатель;

F(*t*) - результирующая н.с. магнитного усилителя, включенного на входе тиристорного возбудителя;

 $F_{\it omc}(t)\,$ - н.с. обмотки токовой отсечки магнитного усилителя.

Для системы векторного управления АД величины записывались в относительных единицах, т.к. расчеты переходных процессов в абсолютных единицах создают определенные неудобства при обобщении результатов исследований (таблица 1.8):

М^{*} - электромагнитный момент;

t^{*}_{s2} - внутренний контур регулирования тока статора в канале регулирования электромагнитного момента и частоты вращения;

У внешний контур регулирования модуля потокосцепления;

L^{*}_{*s*1} - внутренний контур регулирования тока статора в канале регулирования потокосцепления ротора;

образни и пращения.

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. 3.2. 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. 3.2).

Процесс пуска в холостую в системе ГД-КБТ представлена на рис. В случае пуска системы на глубину 5500 м и изменение скорости $\omega_{10}(t)$ нижнего сечения КБТ плавно следует за изменением скорости двигателя и верхнего сечения. Также плавно изменяется и момент двигателя в данных условиях $M_{de}(t)$.

Незначительные колебания появляются и в кривой угла закручивания $\varphi(t)$ рис. При глубине бурения 1000 м. При глубине 5500 м угол закручивания $\varphi(t)$ возрастает плавно. Его установившееся значение составляет $0.13\varphi_{dow}$.

Моменты в сечениях КБТ $M_1(t) \div M_{10}(t)$ возрастают плавно, следуя закону изменения момента двигателя $M_{\partial e}(t)$.

Процесс пуска в системе векторного управления выглядет следующим образом: на начальном участке пусковой характеристике потокосцепление

ротора по экспоненциальной характеристике нарастает до 1 о.е. за счет форсированного нарастания составляющей тока статора *i*₅₁ до значения 3,25 о.е. После завершения переходного процесса В канале регулирования потокосцепления составляющая тока статора i_{s1} снижается до 0,2 о.е. и в дальнейшем не изменяется. Составляющая тока статора i_{s2} также по 5%, небольшим, пределах экспоненциальной характестике С В перерегулированием нарастает до 2,3 о.е. Поскольку пуск двигателя происходит при неизменном потокосцеплении ротора, электромагнитный момент двигателя в масштабе повторяет характеристику составляющей тока статора l_{s2} . После переходных процессов в канале регулирования скорости завершения дальнейший разгон двигателя протекает при почти постоянном моменте, близком к 3,5 о.е. Естественно, что при этом частота вращения двигателя нарастает по линейному закону.

После завершения пуска двигателя величина электромагнитного момента снижается до номинального значения 0,8 о.е., составляющая тока i_{s2} - до значения 0,65 о.е.

Колебания моментов и скорости КБТ тем больше, чем больше производная скорости двигателя в начальный момент пуска привода. Угол закручивания КБТ не превышает допустимых пределов.

Работа двигателя на регулировочных характеристиках позволяет получить более равномерное распределение моментов холостого хода на валу двигателя.







Рис.3.3. Режим пуска в асинхронном электроприводе при трансвекторном управлении.

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

Процесс приложения нагрузки к вращающемуся вхолостую долоту иллюстрируется графиками на рис.3.4. 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 рис. 3.4. представлены графики, иллюстрирующие приложение на долото скачкообразной нагрузки 12 кНм.

При работе двигателя на естественной характеристике, наброс нагрузки величиной 12 кНм на долото является аналогичным процессу прихвата долота. В кривых моментов по сечениям КБТ - $M_1(t) \div M_{10}(t)$ появляются перерегулирования значительной величины, которые оказывают свое влияние на

величину момента двигателя $M_{\partial e}(t)$. 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 φ_{don} (рис. 3.4).

Наброс нагрузки на долото при глубине берения 1000 м в системе ГД-КБТ вызываетостановку долота, которое начинает вращаться спустя 0,6с, т.е. после достижения импульса наброса нагрузки устья и возвращения его обратно. Как и во всех рассмотренных случаях, в данной системе появляются значительные колебания момента и скорости двигателя - $M_{de}(t)$, $\omega_{de}(t)$. Подача на долото момента нагрузки 12 кНм в системе ГД-КБТ при глубине бурения 5500 м вызывает стопорение долота, которое остается в неподвижном состоянии в течении 3,4с. Скорость и момент двигателя плавно изменяется с незначительным перерегулированием. В переходном режиме значение момента двигателя становится больше значения M_{omc} , вступает в действие токовая отсечка и двигатель работает на участке механической характеристики, наклон которой обусловлен величинами M_{omc} и M_{cmmo} . Величины моментов в сечениях КБТ изменяются плавно с незначительным перерегулированием.

Для векторного регулирования АД переходной процесс сопровождается незначительным снижением частоты (рис.3.5) вращения при экспоненциальном нарастании электромагнитного момента и составляющей тока статора l_{s2} . Причем установившееся значение электромагнитного момента 2,6 о.е. превышает критическое значение для рассматриваемого двигателя. Модуль потокосцепления ротора Ψ_{max} и составляющая тока статора l_{s1} в течение

переходного процесса и после его завершения остаются без изменения. То есть в такой системе влияние каналов регулирования друг на друга практически исключено.

Амплитудные значения колебаний моментов в сечениях КБТ при глубине скважины 1000 м возрастает по мере приближения к устью скважины, а при глубине 5500 м нарастает плавно без перерегулирования. Моменты двигателя превышают значения моментов отсечки при бурении на глубину 3000 м, и в значительной степени на глубину 5500 м. Ни в одном из рассмотренных случаев значения углов закручивания не превышают допустимых и колеблются в пределах $0.75 - 0.4\varphi_{oon}$

Скорость долота при всех глубинах в момент наброса нагрузки – спадает до нуля, начинает вращаться снова через 3,4 с. Амплитудные значения колебаний моментов в сечениях КБТ нарастают плавно без перерегулирования. Моменты двигателя превышают значения моментов отсечки на глубине 3000 м и значение угла закручивания не превышает допустимых.



Рис.3.4



Рис.3.5. Режим наброса нагрузки в асинхронном электроприводе при трансвекторном управлении.

3.3 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 с 16 до 8 кНм для различных систем электроприводов при глубине бурения 5000 и отображениы на осциллограммах (рис.3.6).

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 $\omega_{os}(t)$ и $M_{os}(t)$. При срыве долота (рис. 3.6) момент в нижнем сечении

КБТ $M_{10}(t)$ резко падает и кратковременно может даже приобретать отрицательные значения. Скорость двигателя $\omega_{\partial e}(t)$ и момент $M_{\partial e}(t)$ после некоторых колебаний достигают своих значений холостого хода после сравнительно небольшого промежутка времени. В кривой угла закручивания также появляются незначительные колебания.

Скачкообразное уменьшение нагрузки вызывает резкое снижение момента $M_{10}(t)$ в нижнем сечении КБТ. Момент $M_{10}(t)$ без резких колебаний стремится к своему установившемуся значению. Момент же на валу двигателя $M_{\partial e}(t)$ подвергается существенным колебаниям. Скорость долота $\omega_{_{10}}(t)$ также резко колеблется, а скорость двигателя $\omega_{_{\partial e}}(t)$ вследствие существенной жесткости механической характеристики двигателя изменяется несущественно. Незначительный колебательный процесс наблюдается также и в кривой угла закручивания $\varphi(t)$. Все указанные положения наблюдаются и при срыве долота в данной системе. Здесь также небольшими колебаниями характеризуется скорость долота и момент на валу двигателя. Переходный момент уменьшения нагрузки и срыва долота в системе Г-Д характеризуется небольшой продолжительностью по сравнению со всеми вышерассмотренными системами.

Как видно из всех вышеприведенных осциллограмм, снижение M_H вызывает резкий рост скорости долота долота под действием упругих сил. Следует отметить, в нижних сечениях КБТ изменение момента носит колебательный характер. При этом в случае срыва долота с забоя, когда в нижних сечениях $M_{ycm} = 0$, для этих сечений возможны отрицательные значения момента. Появление таких моментов практически не может привести к развинчиванию нижних участков, т.к., во-первых, эти моменты малы по абсолютной величине, во-вторых, ничтожен их импульс по сравнению с импульсом положительных

момнтов и, в-третьих, в реальных условиях момент нагрузки на долоте не может изменяться столь резко. Даже при продольных колебаниях КБТ, когда может иметь место снижения давления на забой и срыв долота, скорость изменения $M_H(t)$ имеет конечное значение, тогда как здесь рассматривается гипотетический случай, когда $dM_H(t)/dt = \infty$. В связи с этим в реальных условиях практически и колебания моментов, и отклонения скорости долота будут существенно меньше.



Рис.3.6.

3.4 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, повидимому, 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 $f = 4\Gamma \mu$ и амплитудой пульсации $M_{H_{max}} = 8,0\kappa H M$ (рис. 3.7).

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. 3.7). Действительно, кривые момента и скорости двигателя - $M_{de}(t)$ и $\omega_{de}(t)$ - не содержат периодических составляющих, т.е. в этом случае момент на валу двигателя и его скорость определяются лишь

величиной средного значения момента нагрузки на долоте -

$$M_{Hcp} = \frac{2}{T_H} \int_{0}^{T_H/2} M_H(t) dt$$
, где $T_H = \frac{1}{f_H}$ - период изменения момента нагрузки.

Анализ переходных процессов в системе Г-Д при приложении пульсирующей нагрузки можно провести с помощью осциллограммы для глубины 5500 м. Кривая момента $M_{10}(t)$ в процессе периодических колебаний имеет нижний предел в отрицательной области, однако это явление не вызывает изменения знака скорости $\omega_{10}(t)$, что исключает возможность развинчивания труб в колонне. Колебания в нижних сечениях не отражаются на характер изменения момента И скорости двигателя. Момент $M_{\partial s}(t)$ и аналогичнослучаю скорость $\omega_{\partial s}(t)$ изменяются приложенияскачкообразной нагрузки на долото. Плавно изменяется и угол закручивания $\varphi(t)$.



Рис 3.7.

3.5 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 $M_{nn} = 8\kappa Hm$ (рис. 3.8).

После прихвата колонны долото останавливается и начинает вращаться спустя промежуток времени, который необходим для достижения обратной волной устья скважины и возвращения ее обратно. Незначительное уменьшение времени возвращения обратной волны к забою объясняется тем, что при прихвате колонны она начинает распространяться к устью скважины с расстояния l' = 4/5l. Действие обратной волны хорошо заметно в кривой изменения момента $M_{10}(t)$, в которой после резкого спада в начальный момент и при дальнейшем плавном нарастании заметен всплеск, действием которого и вызвано трогание долота с места. Угол закручивания изменяется без существенных перерегулирований и установившееся значение не превышает $0.19\varphi_{don}$. Существенные колебания возникают в системе Г-Д при прихвате колонны изменяется практически аналогично вышерассмотренным системам. Под действием момента прихвата $M_{np}(t)$ величины момента двигателя $M_{ds}(t)$ и

скорости долота $\omega_{10}(t)$ существенно колеблются. Хотя долото и не останавливается, однако амплитудное значение его скорости в начальный момент процесса прихвата достигает значительной величины. Переходный процесс в данной системе по своей длительности превосходит длительность аналогичных процессов во всех выше рассмотренных системах и продолжается 12 с, вследствие большой инерционности электропривода.

При бурении на глубину 5500 м долото находится в остановленном состоянии значительно дольше времени, 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 изменяется плавно, без всяких колебаний и перерегулирований.


Рис.3.8.

3.6 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 (рис. 3.9).

Приложение нагрузки величиной $M_{H} = 16\kappa HM$ к долоту вызывает резкое увеличение момента в нижнем сечении $M_{10}(t)$ и спад скорости долота $\omega_{10}(t)$. Долото мгновенно останавливается, а затем под действием «накопленного» упругого момента вновь приходит во вращение. В кривой $\omega_{10}(t)$ появляются пиковые значения значительной величины. Время полупериода колебания скорости долота составляет примерно 0,6 с, что равно времени распространения прямых и обратных волн от забоя к устью и обратно. Аналогично, колебания с такой же частотой появляются в кривой момента $M_{10}(t)$ и, соответственно, в моментах по сечении КБТ. Эти волны, достигая устья скважины, практически без затухания, вызывают интенсивное увеличение момента двигателя $M_{de}(t)$. $M_{\partial \kappa}(t)$ по своей величине превосходят величину Пиковые значения критического момента асинхронного двигателя, поэтому скорость последнего, колебаясь со все уменьшающейся амплитудой, стремится к нулю. Время переходного процесса составляет примерно 3,9с. По окончании переходного процесса момент двигателя принимает значение момента короткого замыкания АД, а колонна остается под напряжением в закрученном состоянии. Величина угла закручивания КБТ также колеблется, а максимальное значение не превышает $0.4\varphi_{don}$.

Подача момента нагрузки $M_{H} = 28 k H M$ на долото в системе Г-Д вызывает стопорение всей системы после окончания переходного процесса. Такая большая

148

величина момента нагрузки обусловлена большим значением момента стопорения двигателя в данной системе $M_{cmon} = 5,760 kH M$ После подачи $M_H(t)$ момент в десятом сечении КБТ достигает своего установившегося значения в два этапа и в кривой $M_{10}(t)$ появляется периодическая состовляющая, амплитуда которой сравнительно невелика. Такой ступенчатый характер изменения $M_{10}(t)$, когда на первом этапе он достигает значения примерно $0,5M_{ycm}(t)$ и в дальнейшем через 0,6 с скачкообразно возрастает до величины $M_{10ycm}(t)$ обусловлен действием процесса наложения прямых и обратных волн. Скорость долота подвергается существенным колебаниям в начальный момент процесса. Момент двигателя также подвергается значительным колебаниям, пиковые значения которых на начальном этапе переходного процесса превосходят величина $M_{de}(t)$ в установившемся режиме становится равной M_{cmon} . Скорость двигателя стремится к своему нулевому значению мономтонно с небольшими колебаниями в начальный период переходного процесса.

Значительные колебаниями характеризуются величины F(t) и $F_{omc}(t)$, причем намагничивающая сила таковой отсечки стремится к своему установившемуся значению величины стопорения.

Переходный процесс в системе Г-Д по своей продолжительности значительно превосходит продолжительность динамических режимов во всех выше рассмотренных системах и состовляет 10,5 с. Такой затяжной процесс прихвата долота в данной системе приводит к существенному увеличению значения угла закручивания КБТ и в своей установившемся состоянии $\varphi(t) = 0.95[\varphi_{don}]$. Таким образом проявляется опасность поломки КБТ вследствие ее значительного скручивания.

149



Рис.3.9.

Список использованной литературы

- Е.К. Юнин, В.К. Хегай. Динамика глубокого бурения. М., Недра, 2004, 286с.
- А.Х. Мирзанджанзаде, З. Г. Керимов, М. Г. Копейкис. Теория колебаний в нефтепромысловом деле. Москва Ижевск 2005.
- Справочник по автоматизированному электроприводу под редакцией В.А. Елисеева и А.В. Шинянского.
- 4. 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

- 10. Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами.М.: Высшая школа, 1979.
- 11. 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.
- 13. Самохин Ф.И. Горная электротехника. М.: Недра, 1972. 384 с.
- 14. Донченко А.С. Справочник механика рудной шахты. М.: Недра, 1978. 583 с.
- 15. 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.
- Ключев В.И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов. – М.: Госэнергоиздат, 1960.
- Чиликин М.Г. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия, 1974. – 568 с.
- 18. Башарин А.В. Управление электроприводами. Л.:Энергоиздат,1982-392с.

19. Дьяконов В.П., Matlab 6 учебный курс – СПб, Питер, 2001,592с