

ӘОЖ 62-83:004.42

DOI 10.52167/1609-1817-2022-121-2-369-377

Д.Ш. Аманбек¹, Э.И. Бусурманова², А.А. Хайрушева²

¹Ғ.Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Алматы, Қазақстан

²Каспийский университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, Ақтау, Қазақстан
E-mail: d.amanbek@aes.kz

МҰНАЙ ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН РЕТТЕЛЕТІН АЙНЫМАЛЫ ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ ҚОЗҒАЛЫС ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН МАТЛАВ ЖҮЙЕСІНДЕ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Мақалада жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің құрылымдық диаграммасы келтірілген. Қарапайым дифференциалдық теңдеулерде, сондай – ақ символдық түрдегі теңдеулерде жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің динамикасының математикалық сипаттамасы берілген. MATLAB математикалық жүйесін қолдана отырып жүйенің тұрақтылығын анықтау үшін реттелетін жиілік түрлендіргіш жүйесі мен асинхронды қозғалтқыштың берілу функциясын қалыптастырудың жаңа бағдарламасы берілген. Жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің беріліс функциясы және асинхронды қозғалтқыштың өтпелі графикасы келтірілген.

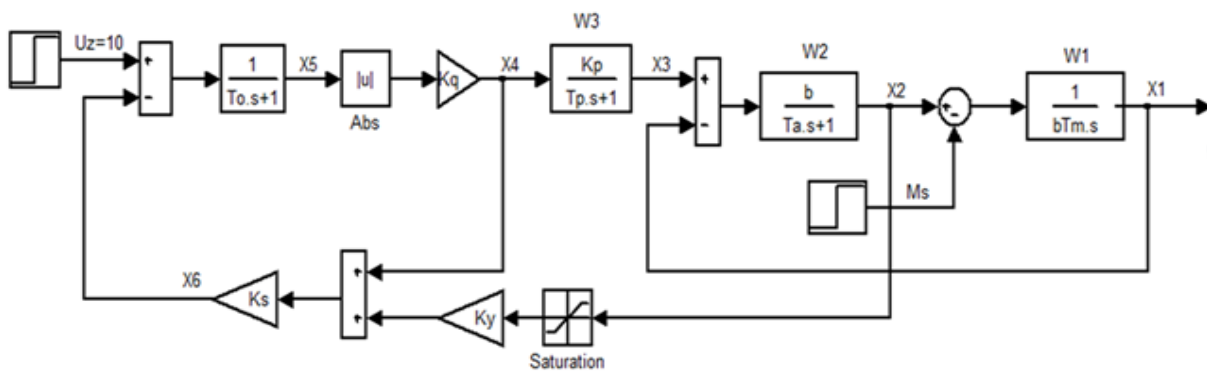
Түйінді сөздер. Асинхронды қозғалтқыш, сорғы қондырғысы, электржетегі, жиілік түрлендіргіш, дифференциалдық теңдеу, тұйықталмаған жүйе.

Кіріспе.

Импульстік автоматты басқару жүйелерінің негізгі ерекшеліктерінің бірі тербелмелі режим болып табылады. Тұрақтылықтың жоғалуы әртүрлі сызықтық емес құбылыстарға, мысалы, гармоникалық тербелістердің, хаотикалық және квазипериодтық режимдердің пайда болуына әкелуі мүмкін. Нәтижесінде электр жетегінің жылдамдығын реттеу дәлдігі төмендейді, қозғалтқыш моментінің тербеліс амплитудасы және зәкірдің бұрыштық жылдамдығы бірнеше ретпен артады. Сондықтан автоматты басқару импульстік жүйелерінің белгілі бір класын жобалау кезінде периодтық режимдердің тұрақтылығын зерттеу маңызды міндет болып табылады. Сондықтан оларды жобалаудағы шешуші міндет берілген динамикалық сипаттамалары бар периодтық режимдердің параметрлік вариациялардың кең диапазонында және кедергі әсерінен тұрақтылығын қамтамасыз ету болып табылады [1, 2]. Бұл құрылған бағдарлама Matlab математикалық жүйесі сызықтық емес басқару жүйелерінің тұрақтылық мәселесін шешуге мүмкіндік береді.

Материалдар мен тәсілдер.

Сорғы қондырғысының айнымалы ток электр жетегінің қозғалысының тұрақтылығын зерттеу ұсынылып отырған тұйықталмаған контурлы жүйе жиілік түрлендіргіші – асинхронды электр жетегінің энергияны үнемдейтін жүйесі болып табылатын асинхронды қозғалтқыш үшін қарастырылады. Жоғарыда айтылғандай [3], ең тиімді энергия үнемдеу өнеркәсіптік қондырғының реттелетін электр жетегін пайдалану арқылы ғана мүмкін болады. 1-суретте ЖТ – АҚ реттелетін жүйенің құрылымдық схемасы Matlab – Simulinc бағдарламасында көрсетілген.



1 сурет - ЖТ – АҚ-ның ашық сызқты емес жүйенің құрылымдық схемасы.

Жиілік түрлендіргіштің және асинхронды қозғалтқыштың тұйықталмаған контурлы жүйесінің құрылымдық схемасы мыналардан тұрады: беру функциялары бар асинхронды қозғалтқыштың сызқты құрылымдық схемасы:

$$W_1(s) = 1/(bT_M s) \quad \text{және} \quad W_2(s) = b/(T_a s + 1),$$

қозғалтқыш жылдамдығы, беріліс функциясы бар жиілік түрлендіргіші

$$W_3(s) = K_p / (T_p s + 1)$$

және беріліс функциясы бар жылдамдық реттегіші бойынша бірлік кері байланыспен қамтылған

$$W_4(s) = 1/(T_2 s + 1).$$

Енгізілген сызқты емес буындар $y = \text{abs}(x)$ және $y = a \tan(x)$ статикалық сілтеме Saturation ауыстыру жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқышты басқару жүйесі асинхронды қозғалтқыштың жылдамдығын реттеу сапасының динамикалық көрсеткіштерін жақсартады және жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыш жүйесінің тұрақтылығының белгілі бір қорын қамтамасыз етеді. Жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыштың ашық сызқты емес жүйесінің тұрақтылығын анықтау мәселесін шешу үшін асинхронды қозғалтқыштың статикалық моментін ескерместен жүйенің өтпелі динамикасының теңдеулерін келесі түрде жазамыз:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= (1/bTm) \cdot x_2, \\ T_a \frac{dx_2}{dt} &= b \cdot x_3 - b \cdot x_1 - x_2, \\ T_p \frac{dx_3}{dt} &= k_p \cdot x_4 - x_3, \\ x_4 &= k_q \cdot \text{abs}(x_5), \\ T_o \frac{dx_5}{dt} &= u - k_s \cdot x_6 - x_5, \\ x_6 &= x_4 + k_Y \cdot a \tan(x_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Осы жердегі $x_1 = \omega$ – АҚ-ның бұрыштық жылдамдығы; $x_2 = M_s$ – АҚ-ның элетромагниттік момент; $x_3 = U_{PR}$ – кернеу шығу түрлендіргіш жиілігі; x_4 – жиілік

түрлендіргішінің кіріс кернеуі; x_5 – АҚ-ның жылдамдық реттегішінің шығысындағы кернеу; x_6 – жиынтық кернеу x_4 және шектеу түріндегі сызықты емес буынның шығуынан кернеу, b – АҚ-ның сызықтық механикалық сипаттамасының қаттылық модулі; T_M – АҚ-ның уақыттың электромеханикалық тұрақтысы; T_a – АҚ-ның статор және ротор тізбектерінің эквивалентті уақыт тұрақтысы; k_p – өткізу коэффициенті түрлендіргіш жиілігі; T_p – жиілік түрлендіргішінің басқару тізбегінің уақыт тұрақтысы; u – сұраныс әсері.

Matlab көмегімен тербелмелі машинаның электр жетегін басқару жүйесінің тұрақтылығын анықтау үшін теңдеулер жүйесін (1) символдық теңдеулер жүйесіне түрлендіреміз. Символдық теңдеулер келесі түрде жазылады:

$$\begin{aligned}w_1 \cdot x_1 - a_1 \cdot x_2 &= 0, \\a_2 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 - a_2 \cdot x_3 &= 0, \\w_3 \cdot x_3 - a_3 \cdot x_4 &= 0, \\x_4 - a_4 \cdot (x_5^2 / x_5) &= 0, \\w_4 \cdot x_5 + a_5 \cdot x_6 - u &= 0, \\-x_4 + x_6 - k_y \cdot \text{sign}(a \tan(x_2)) &= 0,\end{aligned}\tag{2}$$

мұнда $w_1 = s$; $w_2 = (T_a s + 1)/1$; $w_3 = (T_p s + 1)/1$; $w_4 = (T_o s + 1)/1$; $s = d/dt$; $a_1 = 1/(b \cdot T_M)$, $a_2 = b$; $a_3 = k_p$; $a_4 = k_q$; $a_5 = k_s$; q_c – АҚ-ның статикалық момент.

Жиілік түрлендіргіші және асинхронды қозғалтқыш жүйесінің тұрақтылығын анықтау бағдарламасы 3-суретте көрсетілген. Бағдарлама Matlab жүйесінің Symbolic Math Toolbox пакеті негізінде құрастырылған. [4,5].

```
1 function programma
2 syms w1 w2 w3 w4
3 S=solve('w1*x1-a1*x2=0',...
4 'a2*x1+w2*x2-a2*x3=0',...
5 'w3*x3-a3*x4=0',...
6 'x4-a4*(x5^2)/x5=0',...
7 'w4*x5+a5*x6-u=0',...
8 '-x4+x6-k*sign(atan(x2))=0',...
9 'x1,x2,x3,x4,x5,x6');
10 G1=[S.x1]; G2=[S.x2];
11 b=28; Tm=0.176; a1=1/(b*Tm);
12 a2=28;a3=10; a4=1.2; a5=0.1;
13 k=0.1; Mc=200; u=10;
14 w1=tf([1 0],[0 1]);
15 w2=tf([0.05 1],[0 1]);
16 w3=tf([0.001 1],[0 1]);
17 w4=tf([0.06 1],[0 1]);
18 Wc1=eval(G1);
19 Wc2=eval(G2);
20 Wz1=minreal(Wc1)
21 Wz2=minreal(Wc2);
22 p=pole(Wz1)
23 step(Wz1*8,'k.-',Wz2,'b.-',5)
24 grid
25 end
```

2 сурет - Жиілік түрлендіргіші және асинхронды қозғалтқыш жүйесінің тұрақтылығын анықтау бағдарламасы

Есептеу процедурасы келесідей жүзеге асырылады:

- 1) Атаулары бар символдық нысандар енгізіледі w_1, w_2, w_3, w_4 . (1-ші жол).
 - 2) Функция *solve* жиілік түрлендіргіші жүйесінің және асинхронды қозғалтқыштың әр айнымалысы бойынша беріліс функцияларын теңдеулер жүйесіне (15 – ші және 18-ші жолдар) негізделген символдық түрде есептейді (2).
 - 3) Қозғалтқыштың жылдамдығы мен моменті бойынша беріліс функцияларын қалыптастыру үшін жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыш жүйесінің есептелген параметрлері және байланыс коэффициенттері, сондай-ақ жүйенің беріліс функциялары енгізіледі.
 - 4) АҚ жылдамдығы бойынша беріліс функциясы көрсетілген W_{z_1} , ақ моментінің беріліс функциясы осылайша көрсетілген W_{z_2} .
 - 5) Жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыштың автоматтандырылған жүйесінің тұрақтылығы қозғалтқыш жылдамдығының берілу функциясының сипаттамалық теңдеуінің түбірлерінің түріне сәйкес жүзеге асырылады. Функция *pole* (23-ші жол) сипаттамалық теңдеудің түбірлерін есептеуді қамтамасыз етеді.
 - 6) АҚ жылдамдығы мен моментінің өтпелі графиктерін шығару функциямен қамтамасыз етіледі *step* (24 – ая строка).
- Жүйенің беріліс функциясы жиілік түрлендіргіші және асинхронды қозғалтқыш, қозғалтқыш жылдамдығында және функцияның сипаттамалық теңдеуінің тамырлары 3-суретте көрсетілген.

Transfer function:

2.27e008

 $s^4 + 1039 s^3 + 3.915e004 s^2 + 4.891e005 s + 2.121e006$

p =

1.0e+003 *

-1.0000

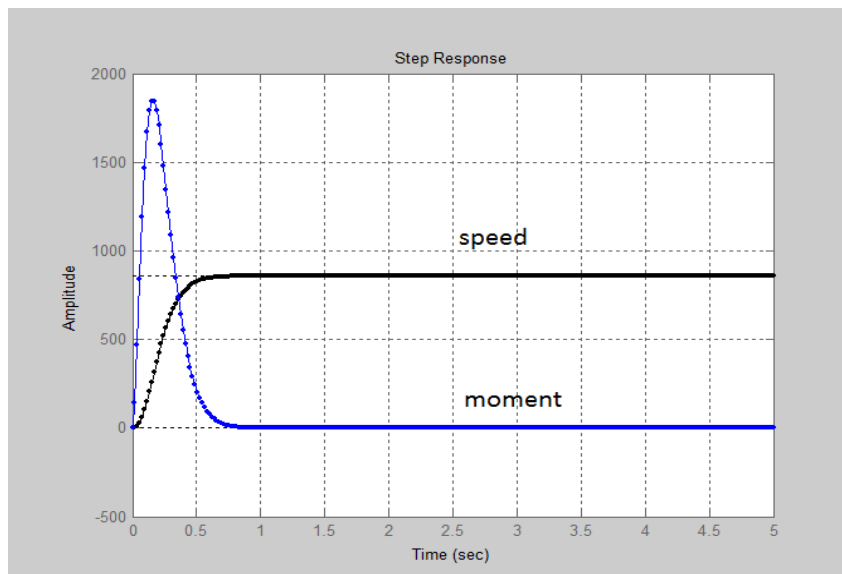
-0.0187

-0.0100 + 0.0037i

-0.0100 - 0.0037i

3 сурет - Беріліс функциясы және сипаттамалық теңдеудің түбірлері

Бағдарламаны есептеу нәтижесінде жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыш жүйесінің беріліс функциясының сипаттамалық теңдеуінің тамыры теріс нақты бөлікпен алынды, осыған байланысты мәлімдеме жасауға болады – жүйе тұрақты болып көрсетілді [6].



4 сурет - Жылдамдық пен моменттің өтпелі графиктері

АҚ-ның жылдамдығы мен моментінің өтпелі графиктері сонымен қатар жүйенің тұрақтылығын сипаттайды.

Жоғарыда жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыштың статикалық моментін ескерместен (қоздыру әсері) ашық жүйенің өтпелі динамикасының теңдеулер жүйесі көрсетілген, соның негізінде жүйенің тұрақтылық мәселесі шешілді. Алайда, жиілік түрлендіргіші жүйесі мен асинхронды қозғалтқыштың тұрақтылық мәселесін MATLAB математикалық жүйесін қолдана отырып статикалық моментті ескере отырып сәтті шешуге болады. Бұл жағдайда жүйенің бірінші теңдеуі (1) келесі түрде жазылады:

$$\frac{dx_1}{dt} = (1/bTm) \cdot x_2 + (1/bTm) \cdot M_C, \quad (3)$$

символдық түрдегі теңдеулер жүйесінің алғашқы теңдеуін (2) түрінде жазуға болады:

$$w_1 \cdot x_1 - a_1 \cdot x_2 = -a_1 \cdot M_C. \quad (4)$$

Жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыш жүйесінің тұрақтылығын анықтау бағдарламасы (2сурет) келесі форманы алады (5 сурет):

```
1 function programma
2 |syms w1 w2 w3 w4
3 |clc
4 |S=solve('w1*x1-a1*x2 = - a1*Mc',...
5 |      'a2*x1+w2*x2-a2*x3=0',...
6 |      'w3*x3-a3*x4=0',...
7 |      'x4-a4*((x5^2)/x5)=0',...
8 |      'w4*x5+a5*x6-u=0',...
9 |      '-x4+x6-k*sign(atan(x2))=0',...
10 |      'x1,x2,x3,x4,x5,x6');
11 |G1=[S.x1]; G2=[S.x2];
12 |b=25; Tm=0.2; a1=1/(b*Tm);
13 |a2=28; a3=10; a4=1.2; a5=0.1;
14 |k=0.1; Mc=150; u=10;
15 |w1=tf([1 0],[0 1]);
16 |w2=tf([0.05 1],[0 1]);
17 |w3=tf([0.001 1],[0 1]);
18 |w4=tf([0.06 1],[0 1]);
19 |Wc1=eval(G1);
20 |Wc2=eval(G2);
21 |Wz1=minreal(Wc1)
22 |Wz2=minreal(Wc2);
23 |p=pole(Wz1)
24 |step(Wz1*8,'k.-',Wz2,'b.-',5)
25 |grid
26 |end
```

5 сурет - Асинхронды қозғалтқыштың статикалық моментін ескере отырып, жиілік түрлендіргіші мен асинхронды қозғалтқыш жүйесінің тұрақтылығын анықтау бағдарламасы

Нәтижелер.

Бағдарламаны есептеу нәтижесінде жүйенің сипаттамалық теңдеуінің берілу функциясы мен түбірлері келесідей болады (6-сурет):

Transfer function:

$$\frac{-30 s^3 - 3.116e004 s^2 - 1.171e006 s + 2.126e008}{s^4 + 1039 s^3 + 3.915e004 s^2 + 4.874e005 s + 2.091e006}$$

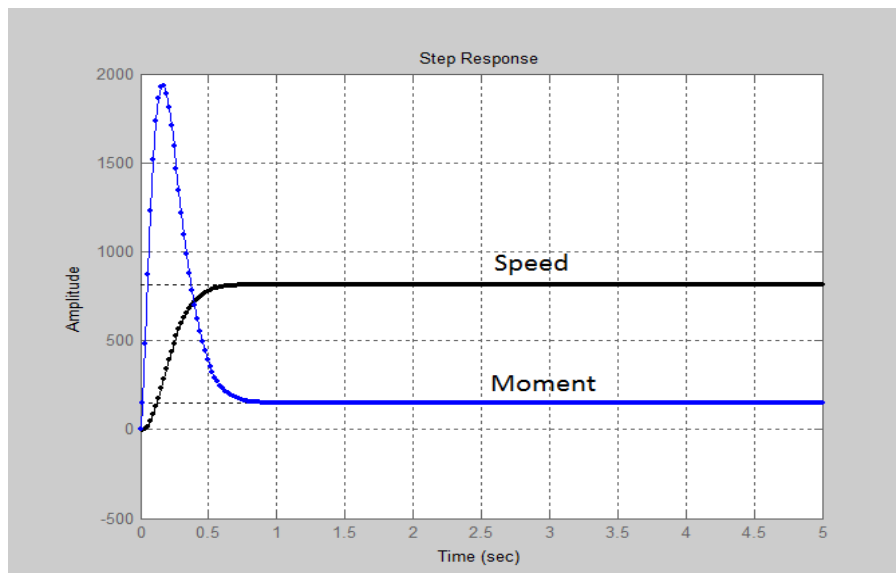
p =

$$1.0e+002 * \\ -10.0000 \\ -0.1867 \\ -0.1000 + 0.0346i \\ -0.1000 - 0.0346i$$

6 сурет - Жүйенің беріліс функциясы жиілік түрлендіргіші және қозғалтқыш жылдамдығындағы асинхронды қозғалтқыш және сипаттамалық теңдеудің түбірлері

Талқылау.

Жиілік түрлендіргіш пен асинхронды қозғалтқыш жүйесі тұрақты, өйткені сипаттамалық теңдеудің барлық түбірлері теріс нақты бөлікке ие. Асинхронды қозғалтқыштың жылдамдығы мен электромагниттік моментінің өтпелі кезеңдері 7-суретте көрсетілген.



7 сурет - Асинхронды қозғалтқыш моментінің графигі

Асинхронды қозғалтқыш жылдамдығының және моментінің өтпелі графиктерін (4-сурет) және жылдамдық пен моменттің өтпелі графиктерін (7-сурет) салыстыра отырып, асинхронды қозғалтқыш моментінің графигі (7-сурет) теңдеудегі статикалық моментті ($M_c \neq 0$) ескере отырып алынғанын атап өтуге болады.

Қорытынды.

Тұрақты токтың электр жетегін басқарудың импульстік жүйесінің тұрақтылығына талдау жасалды, оның мінез-құлқы оң жақтағы дифференциалдық теңдеулермен сипатталады. Дифференциалдық теңдеулердің мерзімді шешімдерін табу мәселесі тұрақты дисплейдегі нүктелерін табу проблемасына дейін азаяды. Бұл зерттеуді жүргізу барысында атқарылған істер:

1. Жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің сызықты емес басқару жүйесі жасалды.
2. Символдық түрде жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің динамикасының математикалық сипаттамасы жасалды.
3. Жиілік түрлендіргіш жүйесі мен асинхронды қозғалтқыштың тұрақтылығын асинхронды қозғалтқыштың статикалық моментін есепке алмай және есепке ала отырып анықтауға арналған бағдарлама әзірленген.

ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] Хаотическая динамика импульсных систем / Ж. Т. Жусубалиев, В. Г. Рубанов, В. С. Титов, О. О. Яночкина. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2018.
- [2] Zhusubaliyev Zh. T., Mosekilde E. Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems. Singapore: World Scientific; 2003. <https://doi.org/10.1142/5313>
- [3] Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008.-
- [4] Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод.– М.: Издат. центр «Академия», 2004.- 256 с.
- [5] Адексеев Е.Р., Чеснокова О.В. MATLAB 7. – М.: ИТ Пресс, 2006. – 464 с.
- [6] Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 1104 с.
- [7] Теория автоматического управления. Ч. II. Под ред. А.В. Нетушила. – М.: «Высшая школа», 1972.

Duman Amanbek, master, lecturer, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, d.amanbek@aes.kz.

Essemgul Bussurmanova, master, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yesenov, Aktau, Kazakhstan, asemgul.burusmanova@yu.edu.kz.

Aurika Khairusheva, master, Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yesenov, Aktau, Kazakhstan, aurika.hairuweva@yu.edu.kz.

INVESTIGATION OF THE MOTION STABILITY OF THE ADJUSTABLE AC ELECTRIC DRIVE FOR OIL PRODUCTION IN THE MATLAB SYSTEM

Abstract. The article presents a structural diagram of an asynchronous electric drive with frequency regulation. In simple differential equations, as well as equations in symbolic form, a

mathematical description of the dynamics of an asynchronous electric drive with frequency regulation is given. A new program for the formation of an adjustable frequency converter system and the transmission function of an asynchronous motor is given to determine the stability of the system using the mathematical system MATLAB. The transmission function of the frequency-regulating asynchronous electric drive and the transient graph of the asynchronous motor are given.

Keywords. Asynchronous motor, pumping unit, electric drive, frequency converter, differential equation, non-closed system.

Думан Аманбек, магистр, преподаватель, Алматинский университет энергетики и телекоммуникаций имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан, d.amanbek@aes.kz .

Эссемгуль Буссурманова, магистр, Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, Актау, Казахстан, asemgul.burusmanova@yu.edu.kz.

Аурика Хайрушева, магистр, Каспийский университет технологий и инжиниринга имени Ш. Есенова, Актау, Казахстан, aurika.hairuweva@yu.edu.kz.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СТАНКА КАЧАЛКИ ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ MATLAB

Аннотация. В статье представлена структурная схема частотно – регулируемого асинхронного электропривода. Дается математическое описание динамики частотно – регулируемого асинхронного электропривода в обыкновенных дифференциальных уравнениях, а также в уравнениях в символьном виде. Дается новая программа образования передаточной функции регулируемой системы ПЧ – АД для определения устойчивости системы с помощью математической системы MATLAB. Приводятся передаточная функция частотно – регулируемого асинхронного электропривода и графики переходных процессов АД.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, насосная установка, электропривод, частотный преобразователь, дифференциальное уравнение, замкнутая система.
