

Simulation kinematischer und dynamischer Modelle von Frontal-Schrämmaschinen für die Automatisierung im Kohlebergbau

Authors:

*Toleukhan Ermekov, Muratbek Arpabekov, Zhaken Kuanyshbaev
L.N.Gumilyov Eurasian National University
010000, Astana/Republik Kasachstan*

Zusammenfassung: Im Kohlebergbau stellen Sicherheit, Produktivität und Nachhaltigkeit ein komplexes Problem dar, dem mithilfe von umfassenden Automatisierungsmaßnahmen begegnet werden kann. Eine Forschungsgruppe der Staatlichen Polytechnischen Universität von Karaganda/Kasachstan hat in Kooperation mit den Betreibern der Karaganda Kohlemine ein Steuerungssystem für eine Frontal-Schrämmaschine entwickelt. Zu diesem Zweck wurden zunächst die kinematischen und dynamischen Modelle einer Frontalschrämmaschine (FEM-5) geprüft und bewertet. Anschließend wurden die Systeme mit unterschiedlichen Anfangsparametern auf ihre Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium getestet, und hinsichtlich der Stabilität im geschlossenen und offenen Kreislauf mit unterschiedlichen Werten eines Proportionalreglers untersucht.

1 Einleitung

Robotertechnik und Automatisierung für die Produktionsprozesse, den Umweltschutz und für Maßnahmen zur Minimierung von negativen Umweltauswirkungen auf die Menschen haben Priorität im Entwicklungskonzept der kasachischen Bergbauindustrie für den Zeitraum bis 2020, das von der Regierung der Republik Kasachstan verabschiedet wurde [1].

Die vorhandenen Technologien erfordern nach wie vor die kontinuierliche Anwesenheit von Menschen in den Schächten und Strossen, trotz der ungünstigen und gesundheitsgefährdenden Umgebung, aufgrund des hohen Staub- und Gasgehalts oder der Verletzungsrisiken. Außerdem besteht die Gefahr, dass sich die Bergarbeiter in Bereichen von Gas-Kohlenstaub-Explosionen aufhalten, oder sie giftigen Gasen wie z.B. CH₄ und CO ausgesetzt sind und dadurch teure und zeitaufwändige Rettungsaktionen notwendig werden [2]. Neben der Steigerung der Produktqualität ist daher die Vermeidung harter körperlicher Arbeit von Menschen in Bereichen mit ungünstigen Bedingungen ein wichtiges Ziel von Verbesserungsmaßnahmen. Der Einsatz von Robotertechnik beim Abbau kohlehaltiger Schichten ist die effektivste Art, dieses Ziel zu erreichen.

Als Grundlage für die computerbasierte Programmierung eines Steuerungssystems des FEM-5 (Mining Automated Extraction Manipulator) im Kohlebergbau müssen zunächst kinematische Modelle und die Dynamik des FEM-5 bewertet werden. Das Ziel einer dynamischen Steuerung besteht darin, die erforderliche dynamische Reaktion vom computergesteuerten RTC-Anlage zu erhalten, die einigen vorläufig bestimmten Kriterien entspricht. Diese Kriterien können über Impulse, Reaktionskräfte und Trägheitsauswirkungen auf die Schneidkronen ausgedrückt werden. Dabei müssen zum einen die Hauptgleichungen

der Roboterdynamik in Form eines dynamischen Modells des FEM-5 erhalten bleiben, zum anderen weitere Steuerungsregeln zu bestimmt werden, um dynamische Reaktionen zu erreichen.

Der computergesteuerte Abbaumanipulator kann als ein offener kinematischer und dynamischer Kreislauf verschiedener fester Körper (Segmente) modelliert und danach durch Drehkupplungen verbunden werden. Da die Lösung des reziproken kinematischen Problems bereits bekannt ist [3], findet man einen Satz von integrierten Winkeln θ_i , die es gestatten, die Position und Ausrichtung der Schneidkrone über T_i^0 einzustellen und bezüglich des Koordinatengrundsystems festzulegen. Bei der Statistik und Dynamik von Robotern kann man mit den integrierten Kräften f_i und Momenten t_i arbeiten, die es gestatten, die erforderliche Kraft f und den Moment t auf der Schneidkrone zu erreichen. Auf diese Weise kann man mit dem reziproken Ziel der Dynamik der Manipulatoren, d.h. mit der Aufgabe der Berechnung der integrierten Momente arbeiten, die erforderlich sind, um die vorher eingestellten, verallgemeinerten Koordinaten der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu erhalten.

Es gibt drei Methoden, die Gesamtsumme der genügend verketteten, nichtlinearen Differentialgleichungen zu erhalten, die die Dynamik des FEM-5 (Bild 1) beschreiben: Präsentation der Dynamik mit Hilfe der Methode verbundener Diagramme (von Hank Painter 1950 entwickelt) Präsentation der Dynamik durch die Newton-Eiler-Methode

- Präsentation der Dynamik durch die Lagrange-Eiler-Methode

Neben diesen Methoden der Darstellung der Dynamik von Manipulationsrobotern sind zwei rekursive Methoden bekannt. Dabei handelt es sich um die rekursiven Methoden von Newton-Eiler und Lagrange. Diese rekursiven Methoden gestatten eine ausreichende Reduzierung der Anzahl der Berechnungen. Die Effektivität dieser Methoden beruht auf der Gesamtsumme der sich wiederholenden Verknüpfungen zwischen den Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und integrierten Kräften. Die Anzahl der Additionen und Multiplikationen bei diesen Methoden ändert sich im Verhältnis zur Anzahl der Verbindungen (n) im Gegensatz zu den vorherigen Methoden mit Abhängigkeiten von den höheren Graden n [4].



1 Allgemeine Ansicht des Versuchsmanipulators FEM-5

Die Studie begann mit dem Forschungsprogramm zur Automatisierung von Strebschrämmaschinen des Longwall Automation Steering Committee (LASC) in Australien. Diese Methode ist erforderlich, um ein Flöz in unterschiedlichen Höhen abzubauen [5, 6].

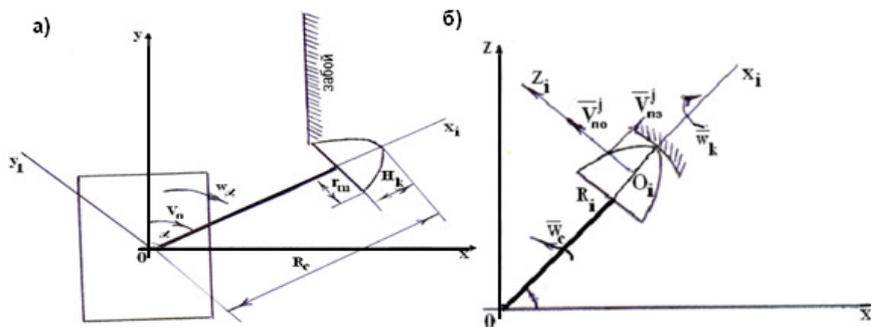
2 Überblick über die Modellierung der Kinetik von automatischen Abbaumanipulatoren

Der Betrieb von eng umfassenden Abbaumanipulatoren wird durch eine hohe dynamische Belastung charakterisiert. Eine Analyse der Hauptfaktoren, die die dynamischen Prozesse in Manipulatoren bestimmen, zeigte, dass von der Anzahl aller Parameter des Manipulators die Ungleichmäßigkeit des Austrags als Ergebnis der geringen Steifigkeit des Zugteils sowie eine nichtlineare Kraft der Gleitreibung am wichtigsten sind.

Da die Dynamik der Antriebsbelastung eine wesentliche Auswirkung auf die Produktivität der automatisierten Gewinnungstechnik hat, ist und bleibt die Reduzierung der ungleichmäßigen Belastung das primäre und vordringliche Ziel. Dieses Ziel wird auf unterschiedliche Weise erreicht. Am gängigsten dabei sind die Erhöhung der Steifigkeit der Austragsanlage, die Veränderung der Konstruktion des Bremsteils (Layout des Schneidkopfs) sowie die Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit. Nach dem Ergebnis vieler Forschungsarbeiten sind die Erhöhung der Austragsgeschwindigkeit und der Steifigkeit der Vortriebsanlage am effektivsten. Dabei [7, 8] führt die Beschleunigung des RTC-Austrags (bei V_a 11 m/min) zum Verlust der Eigenschwingung bezogen auf den Reibungsfaktor. Entsprechend den Forschungsarbeiten [9] hat der Steifigkeitsfaktor der geringsten natürlichen Schwingungen eine wesentliche Auswirkung auf die Veränderungen, und die Austragsgeschwindigkeit hat die meisten Auswirkungen auf die höchsten natürlichen Schwingungen.

Beim automatischen Abbaumanipulator im Bergbau begrenzt die verfügbare Energie die Erhöhung der Austragsgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Energiezufuhr für den Betrieb führt zu einer Zunahme des Gewichts und der gesamten Abmessungen. Daher ist die Erhöhung der Austragssteifigkeit des FEM-5 der effektivste Faktor zur Reduzierung der dynamischen Belastung des FEM-5. In diesem Zusammenhang empfiehlt die Forschung eine Steifigkeit von $C > 50 \cdot 10^5$ N/m für einen Abbaumanipulator mit einer Masse von 6000 kg. In diesem Fall wird die Eigenschwingung der Änderung der Austragsgeschwindigkeit durch die Oberschwingung mit einer geringeren Schwingungsamplitude als dem Durchschnittswert der Geschwindigkeit ersetzt.

L.P. Vozlublennaya, Kandidatin der technischen Wissenschaften und außerordentliche Professorin, hat in ihren Forschungsarbeiten zu den Kegelschnecken der Schneidkronen von Abbaumaschinen drei Mobilitätsgrade nachgewiesen. Dieser Nachweis ist die Basis für das vorliegende Projekt mit den Frontal-Schrämmschneidmaschinen des Typs FEM-5. Die Dynamik eines Abbaumanipulators wird u.a. durch die Werte bestimmt, die als Zeitfunktionen t zugeordnet sind (Bild 2): Geschwindigkeit der Abbaumaschine entlang der Abbauwand $v_n(t)$, Winkel des Angriffs der Wand durch den Manipulator $\alpha_0(t)$, Geschwindigkeit des Schwenkwinkels des Manipulators in der horizontalen Ebene $\omega_\alpha(t)$, Winkelgeschwindigkeit der Auslegerschwenkbewegung des Manipulators $\omega_c(t)$, Winkel der Drehung des Manipulatorauslegers $\varphi_c(t)$ in der vertikalen Ebene [10].



2 Kinematisches Modell des Vortriebs des Manipulators mit Schneidkopf

a) in horizontaler Ebene

b) in vertikaler Ebene

Die Anfangswerte φ_{c0} , α_{k0} und Endwerte φ_{ck} , α_{ck} der Schwenkwinkel des Manipulators in der vertikalen und horizontalen Ebene werden durch die Bewegungsverhältnisse (von unten nach oben) zugeordnet:

$$\varphi_{c0} = -\arcsin \frac{H_M}{R_C}$$

$$\varphi_c = \varphi_{c0} + \int_0^t \omega_c(t) dt$$

$$\varphi_{ck} = \arcsin \frac{H_{nl} - H_M}{R_C} \quad (1)$$

$$\alpha_{ak} = \arcsin \frac{B_3 + \sin \alpha_0 (R_C - H_k)}{R_C} - \frac{r_k \cos \alpha_0}{R_C}$$

Die Winkel $\varphi_c(t)$ und $\alpha_0(t)$ werden bestimmt als (3.2):

$$\varphi_c(t) = \varphi_{c0} + \int_0^t \omega_c(t) dt$$

$$\alpha_0(t) = \alpha_{ak} + \int_0^t \omega_\alpha(t) dt \quad (2)$$

Dabei gilt:

- H_M = Maschinenhöhe bezogen auf den Boden durch die Drehachse des Manipulators m
- R_C = Länge des Manipulorauslegers m
- H_k = Länge der Krone m
- H_K = Abbaustärke des Flözes m
- r_k = maximaler Radius der Krone m

Das Bedienelement (Krone) des Manipulators dreht sich um seine Achse mit der Frequenz n_{06} und hat die Länge H_r und den maximalen Radius r_k (an der Grundfläche). Für die Beschreibung der Manipulatorbewegung verbinden wir das Grundsystem von Koordinaten O_{xyz} mit der Abbauwand und tragen für die Beschreibung jedes i -Schneidkopfs auf dem Bedienelement das Koordinatensystem $O_i x_i y_i z_i$ ein, das starr mit der Ebene des i -Schneidkopfes verbunden ist, der sich zusammen mit dem Bedienelement dreht.

Der Durchschnittswert des Aufgabeschubs wird automatisch beibehalten entsprechend der verbrauchten Energie beim Umschalten der Motorlast, was zu einer Änderung des Verbrauchs der Aufgabe in die Hydraulikzylinder durch die gesteuerte Pumpe NP 120 führt [7].

Der Computer simuliert die Bewegung des i-Schneidkopfes und den Vortrieb des FEM-5. Für die Computersimulation der Manipulardynamik ist es erforderlich, die folgenden Werte zu bestimmen und sie dem Programmcode von MatLab hinzuzufügen. Die Aufgaben für die Simulationsmodellierung in der MatLab-Umgebung werden gelöst.

Zur Bestimmung der Konfiguration der Schneidköpfe auf dem Bedienelement werden die folgenden Werte herangezogen:

- Δ_{ν_i} = zentraler Drehwinkel zwischen den i-Schneidköpfen und den (i-1)-Schneidköpfen [rad.];
- Δ_{x_i} = Abstand zwischen den Enden der i-Schneidköpfe und den (i-1)-Schneidköpfen entlang der Achse x_i [m];
- Δ_{z_i} = Abstand zwischen den Enden der i-Schneidköpfe und (i+1)-Schneidköpfe entlang der Achse z_i [m];
- Δ_{ϕ_i} = zentraler Drehwinkel zwischen den i-Schneidköpfen und dem vorherigen in der gleichen Schnittlinie (wenn die Schnittlinie einen Schneidkopf hat, dann gilt $\Delta_{\phi_i} = 2\pi$) [rad.];

Wenn man den Winkelaustausch der Schneidköpfe des Bedienelements kennt, ist es möglich, den Anfangsdrehwinkel für die i-Schneidköpfe zu bestimmen:

$$\gamma_{oi} = \sum_{j=1}^i \Delta\gamma_j \quad (3)$$

So kann man durch Eingabe der o.a. Werte die Koordinaten im Grundsystem der Koordinaten 0_{xyz} für jeden Schneidkopf des Bedienelements zu jedem Zeitpunkt bestimmen, wie auch seine spezielle Ausrichtung und seinen Standort in Bezug auf die benachbarten Schneidköpfe. Diese Vielzahl von mathematischen Variablen ist die Gesamtsumme aus der Eingabe von Parametern für die Erforschung und der Bildung eines Suchlaufmodells und der Belastung des Bedienelements des Manipulators.

Wie bei der Beschreibung der Bewegung des Manipulators ist es erforderlich, das Grundsystem von Koordinaten 0_{xyz} starr mit der Abbauwand zu verbinden und für die Beschreibung der Bewegung eines jeden i-Schneidkopfes auf dem Bedienelement das Koordinatensystem $0_i x_i y_i z_i$ einzugeben, das starr mit der Ebene der Drehung des i-Schneidkopfes zusammen mit dem Bedienelement verbunden ist. Eine Verbindung zwischen diesen zwei Koordinatensystemen wird durch die Formeln (4) und (5) ausgedrückt, wobei die Achsen x_i und y_i mit der Achsrichtung des Manipulators verbunden sind und als Zwischenelemente für Verbindung des Systems der Koordinaten 0_{xyz} и $0_i x_i y_i z_i$ dienen.

$$\begin{cases} x = x_1 \sin\alpha_0 - y_1 \cos\alpha_0, \\ y = x_1 \cos\alpha_0 + y_1 \sin\alpha_0 \end{cases} \begin{cases} x_1 = x \sin\alpha_0 + y \cos\alpha_0, \\ y_1 = -x \cos\alpha_0 + y \sin\alpha_0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = x_1 \sin\alpha_0 - y_1 \cos\alpha_0, \\ y = x_1 \cos\alpha_0 + y_1 \sin\alpha_0 \end{cases} \begin{cases} x_1 = x \sin\alpha_0 + y \cos\alpha_0, \\ y_1 = -x \cos\alpha_0 + y \sin\alpha_0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_i = \left(x_1 - \sin\alpha_0 \int_0^t v_n(t) dt + z_i \sin\phi_0 \right) \\ y_i = y_1 - \cos\alpha_0 \cdot \int_0^t v_n(t) dt, \\ z_i = - \left(x_1 - \sin\alpha_0 \int_0^t v_n(t) dt \right) \sin\alpha_0 + z_1 \cos\phi_0. \end{cases}$$

Im System der Koordinaten $0_i x_i y_i z_i$ wird die Position des i -Schneidkopfes (Bild 3) durch den Winkel seiner Drehung $\gamma_i(t)$ bestimmt, die gleich

$$\gamma_i(t) = \gamma_{oi} + 2\pi n_{o6} t \quad (6)$$

ist, wobei γ_{oi} der Anfangswinkel der Drehung des i -Schneidkopfes ist.

Der Winkel β_{zi} hat nur für die Schneidköpfe einen anderen Wert als Null, wenn deren Achse von der Ebene der Drehung des i -Schneidkopfes (oder Ebene des Schneidens) abgelenkt wird. Andererseits wird der Winkel β_{zi} für die drehenden Schneidköpfe, mit denen die Bedienelemente der automatischen Abbaumanipulatoren FEM-5 im Bergbau bestückt sind, durch die Bedingung bestimmt, dass die Achse des i -Schneidkopfes auf der normalen Ebene bezüglich der Oberfläche des Bedienelements angeordnet ist (für die Krone ist diese Oberfläche parabolisch):

$$\beta_{1i} = \arccos \frac{2r_i H_k}{\sqrt{r_k^4 + 4r_i^2 H_i^2}} \quad (7)$$

wobei der Radius r_i der Drehung der Grundfläche des i -Schneidkopfes ist, H_i ist der Abstand zwischen dem Kronenende und der Grundfläche des i -Schneidkopfes entlang der Achse x_i .

Die Werte r_i und H_i für das verzahnte Bedienelement sind durch das Größenverhältnis (8) gebunden:

$$r_i = r_k \sqrt{H_i} / H_k \quad (8)$$

Wenn man die Winkel β_{1i} , β_{2i} und die Länge l des Schneidkopfes kennt, kann man alle geometrischen Kennziffern des Schneidkopfes, insbesondere den Radius P_i der Drehung des i -Schneidkopfes, bestimmen:

$$P_i = \sqrt{r_i^2 + l^2 (1 - \sin^2 \beta_{1i} \cdot \operatorname{tg}^2 \beta_{2i}) + 2r_i l \cdot \sin \beta_{2i}} \quad (9)$$

Der Radius R_i der Mitte der Drehung des Koordinatensystems $0_i x_i y_i z_i$ (A Punkte von O) in der vertikalen Ebene ist gleich:

$$R_i = R_c - H_i + l \cdot \sin \beta_{1i} \cdot \operatorname{tg} \beta_{2i} \quad (10)$$

Für die Bestimmung der Konfiguration der Schneidköpfe auf dem Bedienelement gelten folgende Werte:

- Δ_{γ_i} = zentraler Drehwinkel zwischen den i -Schneidköpfen und den $(i-1)$ -Schneidköpfen [rad.]
- Δ_{x_i} = Abstand zwischen den Enden der i -Schneidköpfe und $(i-1)$ -Schneidköpfe entlang der Achse x_i [m]
- Δ_{z_i} = Abstand zwischen den Enden der i -Schneidköpfe und $(i+1)$ -Schneidköpfe entlang der Achse z_i [m];
- Δ_{φ_i} = zentraler Drehwinkel zwischen den i -Schneidköpfen und dem vorherigen in der gleichen Schnittlinie (wenn sich nur ein Schneidkopf in der Schnittlinie befindet, gilt $\Delta_{\varphi_i} = 2\pi$) [rad.]

Die Werte Δ_{x_i} und Δ_{z_i} werden mit den Formeln (11) und (12) berechnet:

$$\Delta x_i = H_i - H_{i-1} + l \cdot (\sin\beta_i \operatorname{tg}\beta_{2i} - \sin\beta_{1(i-1)} \operatorname{tg}\beta_{2(i-1)}) \quad (11)$$

$$\Delta z_i = P_{i+1} - P_i \quad (12)$$

Wenn man die Winkelverlagerung der Schneidköpfe des Bedienelements kennt, kann man den Anfangsdrehwinkel für die i -Schneidköpfe bestimmen:

$$\gamma_{oi} = \sum_{j=1}^i \Delta\gamma_j \quad (13)$$

So kann man mittels der eingetragenen Werte für jeden Schneidkopf des Bedienelements zu jedem Zeitpunkt seine Koordinaten im Grundsystem der Koordinaten 0_{xyz} sowie auf Grund seiner speziellen Ausrichtung und seines Standorts bezüglich der benachbarten Schneidköpfe bestimmen. Diese Vielzahl von mathematischen Variablen ist die Gesamtsumme aus der Eingabe von Parametern für die Erforschung und der Bildung eines Suchlaufmodells und der Belastung des Bedienelements des Manipulators.

3 Dynamik des automatischen Abbaumanipulators FEM-5 im Bergbau

Während die Konverter des Winkels des Vortriebsteils vorrücken bedient der Positionssensor die Synchroneneinheiten, zum einen für die Bestimmung der jeweiligen Position des Vortriebsteils und zum anderen für die jeweilige Einstellung. Ein Fehlersignal – verstärkt über einen Tandemenergieverstärker – wird über einen phasenempfindlichen Verstärker den Nachführungsgeräten zugeführt und zwischen der jeweiligen Position eingestellt. Nachführungsgeräte wandeln die elektrischen Signale um wie auch die mechanischen Bewegungen der hydraulischen Verstärkerspule, die für die Ölzufuhr in den Hydraulikzylindern für den Austrag des Bedienelements sorgen.

Als Grundlage für den Anlagenbetrieb dient das Prinzip der Programmsteuerung des Steuerteils mit dem Einsatz von Nockenmitnehmern und der Belastung der Motorregulierung des Schneidantriebs entsprechend der verwendeten Energie durch eine Änderung der Austragsgeschwindigkeit [11].

Die Übertragungsfunktion des Trafodrehmelders im Transformatormodus sieht folgendermaßen aus: $W_1(\delta) = K_1$, wobei K_1 ein Proportionalitätsfaktor ist. Die Übertragungsfunktion des phasenempfindlichen Verstärkers ist gleich: $W_1(\delta) = K_2$, wobei K_2 der Verstärkungswert ist.

Nach den Darlegungen in [89, 92] werden die dynamischen Merkmale des elektrischen Teils der elektrischen, hydraulischen Nachführungsrolle vom Typ PUMK durch folgende Übertragungsfunktion beschrieben:

$$W_3(\delta) = \frac{O_1(\delta)}{U_1(\delta)} = \frac{K_y}{A_4 \delta^4 + A_3 \delta^3 + A_2 \delta^2 + A_1 \delta + 1}, \quad (14)$$

Hier gilt:

- Y_1 = Vorlauf der Spulennadel
- U_1 = Spannung der Spulenzuführung
- K_3 = Übertragungsfaktor

Für den hydraulischen Teil lautet die Übertragungsfunktion der Nachführungsantriebe:

$$W_4(\delta) = \frac{Q(\delta)}{O_1(\delta)} = \frac{K_a}{(A_5 \delta + 1) \cdot (A_6 \delta + 1)}, \quad (15)$$

Hier gilt:

- Q = Ölverbrauch
- K_r = Übertragungsfaktor

Für den hydraulischen Verstärkertyp mit Spule und starrer Hebelkupplung lautet die Übertragungsfunktion [7]:

$$W_5(\delta) = \frac{K_3}{C_5 \delta^2 + C_6 \delta + 1}$$

Dabei ist K_3 ein Übertragungsfaktor des hydraulischen Verstärkers.

Für den hydraulischen Steuerungsmechanismus mit hydraulischem, zweiseitig wirkenden Arbeitszylinder und Spulensteuerung bietet die Übertragungsfunktion das Bild eines integrierenden Segments [12]:

$$W_6(\delta) = \frac{K_i}{\delta}$$

Dabei ist K_m die Übertragungsfunktion des Hydraulikzylinders.

Die Übertragungsfunktion des offenen Untersystems der horizontalen Zuführung kann wie folgt dargestellt werden:

$$W(\delta) = \frac{\hat{E}_1 \cdot \hat{E}_2 \cdot \hat{E}_y \cdot \hat{E}_3 \cdot \hat{E}_i}{(A_4 \delta^4 + A_3 \delta^3 + A_2 \delta^2 + A_1 \delta + 1) \cdot (A_5 \delta + 1) \cdot (A_6 \delta + 1) \cdot (C_5 \delta^2 + C_6 \delta + 1)}. \quad (18)$$

Es ist sehr schwierig, den Faktor dieser Übertragungsfunktion theoretisch zu bestimmen, aber in [8, 9] wird gezeigt, dass die Übertragungsfunktion

$$W(p) = \frac{K_3 K_2 K_m}{(A_4 p^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + 1) \cdot (A_6 p + 1) \cdot (A_6 p + 1) \cdot (C_5 p^2 + C_6 p + 1)} \quad (19)$$

angenähert durch die Funktion des unten aufgeführten Typs dargestellt werden kann

$$W_B(\delta) = \frac{K}{T^2 \delta^2 + 2E_1 T_1 \delta + 1}, \quad (20)$$

Dabei gilt:

$T_1 = 0,004c$ als konstante Zeit;

$E_1 = 0,05$ als Dämpfungsfaktor

$$K = 0,35 \frac{\pi/MUH}{B}$$

Diese Übertragungsfunktion gilt für das Segment im Eingabeparameter mit der Spannung der Nachführungsspule. Der Ausgabeparameter ist der Flüssigkeitsverbrauch, d.h. die Übertragungsfunktion des offenen Untersystems kann wie folgt dargestellt werden:

$$W_{cn}(\delta) = \frac{K_{cn}}{\delta \cdot (T_1^2 \delta^2 + 2E_1 T_1 \delta + 1)}. \quad (21)$$

Dieses Untersystem wird im Folgenden untersucht, d.h. bezüglich seiner Stabilität geprüft und die Qualität des Systems bei dem zugeordneten Wert des Fehlers des Eingabewerts bewertet. Die Qualität des Nachführungssystems wird durch die Genauigkeit des reproduzierenden Eingabewerts bestimmt.

Anschließend wird der Verstärkungswert bestimmt, da der Fehlerwert und der Wert der Änderung des Eingabesignals bekannt sind. Der Beharrungszustand sollte berücksichtigt werden, d.h. die Auswirkung der Veränderungen bei konstanter Geschwindigkeit:

$$\Delta\psi = \frac{V}{K}; \quad K = \frac{V}{\Delta\psi} \quad (22)$$

Es folgt:

$$K_{cn} = \frac{0,046}{0,005} = 9,2.$$

Dann wird das System hinsichtlich der Stabilität bei einem solchen Verstärkungswert überprüft:

$$W_{\bar{n}\bar{i}}(\delta) = \frac{9,2}{\delta[0,041^2 \delta^2 + 2 \cdot 0,05 \cdot 0,041 \delta + 1]}$$

Eine Überprüfung nach dem Gurvits-Kriterium zeigt, dass ein solches System nicht stabil ist. Um das System stabil zu machen, ist es notwendig, Korrektursegmente einzugeben. Zur Bestimmung der Art des Korrektursegments und seiner Parameter verwenden wir die Methode der logarithmischen Kennziffern. Das Bode-Diagramm wird bestimmt für:

$$W_{\bar{n}\bar{i}}(\delta) = \frac{K_{\bar{n}\bar{i}}}{\delta \cdot (\alpha \cdot \delta^2 + b\delta + 1)},$$

Dabei gilt $\alpha = 0,041^2$; $B = 0,0041$, das aussieht wie

$$L(w) = 20 \lg \frac{k_{cn}}{p} - 20 \lg(ap^2 + bp + 1),$$

Dabei gilt $\alpha = 0,041^2$; $B = 0,0041$, das aussieht wie

$$w_k = \frac{\mathcal{E}_{max}}{V_{max}}, L_x(w) = 20 \lg \frac{\delta_{max}}{\Delta \psi_{max}}, \quad (25)$$

Dabei gilt:

$$V_{max} = 0,046 p a \delta / c -$$

als Maximalwert der Änderung des Eingangssignals

$$\Delta \psi_{max} = 0,5\% -$$

als maximaler Fehler des reproduzierenden Eingangssignals

$$\delta = \frac{V_{max}^2}{\mathcal{E}_{max}} -$$

als Amplitude des äquivalenten Modus der Oberwellenauswirkung;

$$\mathcal{E}_{max} -$$

als maximale Beschleunigung des Eingangssignals.

Die Asymptote mit einfacher Neigung entspricht der Mittenfrequenz der logarithmischen Kennzahl. Sie verläuft durch das Amplitudenintervall:

$$\frac{M}{M-1} \geq A \cdot (\omega) \geq \frac{M}{M+1}. \quad (26)$$

Die Kennzahl der logarithmischen Frequenz des integrierenden Segments wird wie folgt bestimmt:

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T_1 - \arctg \omega T_2 = -\arctg \frac{\omega \cdot (T_1 - T_2)}{1 + \omega^2 T_1 \cdot T_2} = -\arctg \frac{\omega}{1 + 2\omega^2} \quad (27)$$

Im Hochfrequenzbereich verbinden wir die Neigung von LAC mit der Neigung der tatsächlichen LAC, da das Hochfrequenzdiagramm die Qualität und Stabilität des Systems nicht beeinträchtigt. Dann hat die Kennzahl des Korrektursegments folgende Übertragungsfunktion:

$$W(\delta) = K \frac{1 + T_2 \delta}{1 + T_1 \delta} \cdot \frac{1 + T_4 \delta}{1 + T_3 \delta} \quad (28)$$

Dabei gilt:

$$T_1 = \frac{1}{w_1} = \frac{1}{0,49} = 2c., T_2 = \frac{1}{w_2} = \frac{1}{1,0} = 1c., T_3 = \frac{1}{w_3} = \frac{1}{5,2} = 0,19c., T_4 = \frac{1}{w_4} = \frac{1}{24,4} = 0,041c.$$

Entsprechend lautet die Übertragungsfunktion des offenen, korrigierten Systems:

$$W_{ck}(\delta) = \frac{9,2K \cdot (1 + \delta) \cdot (1 + 0,041\delta)}{\delta \cdot (0,041^2 \delta^2 + 0,0041\delta + 1) \cdot (1 + 2\delta) \cdot (1 + 0,19\delta)}$$

Neben den Qualitätserfordernissen gehört eine Reihe weiterer Voraussetzungen zu dem Regelsystem, in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen des geregelten Objekts. Man nennt sie die Qualitätskennziffern. Daher wird nun die Qualität des Regelverfahrens mit der indirekten Näherungsmethode bewertet, d.h. mit der Methode der Verteilung der Wurzeln der charakteristischen Gleichung [11]. Die Schwingung des Systems hängt von den schwingenden Segmenten ab.

Um die Qualität der Regulierung zu erhöhen, wird die Korrektur mit Hilfe der Umkehrverbindungen verwendet. Durch den versuchsweisen Einsatz von Parametern von Übertragungsfunktionen des korrigierenden Segments und solchen von Segmenten ohne Feedback kann man die eingestellte Form des Übergangsprozesses erreichen.

Eine Analyse der Wirkung der verschiedenen Korrektursegmente auf die Qualität des Regelsystems zeigte, dass die kombinierte Korrektur mit dem nachträglich angeschlossenen integrierenden Segment am vollständigsten den eingestellten Parametern genügt, und das schwingende Segment wird vom Feedback durch ein echtes differenzierendes Segment erfasst. Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Systems lautet:

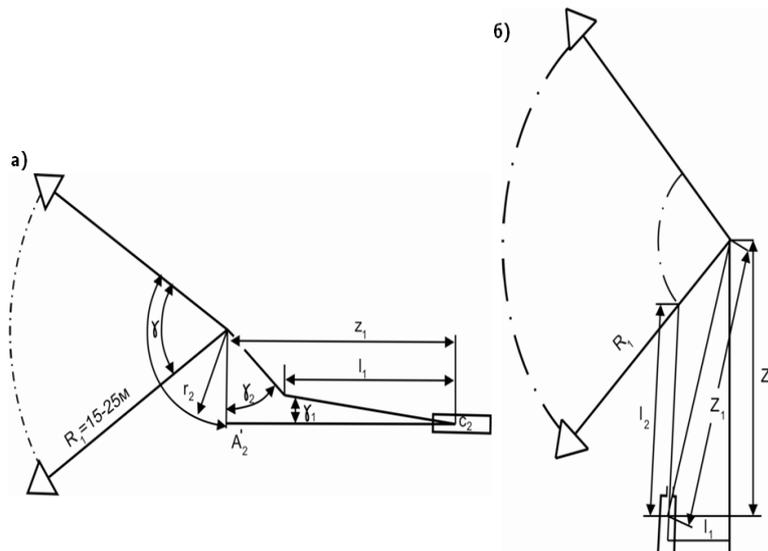
$$W_3(\delta) = \frac{W_p(\delta)}{1 + W_p(\delta)} = \frac{\frac{W_1 K_2}{\delta(1 + W_1 W_2)} \hbar \frac{1 + T_1 \delta}{1 + T_{11} \delta}}{1 + \frac{W_1 K}{\delta(1 + W_1 W_2)} \hbar \frac{1 + T_1 \delta}{1 + T_{11} \delta} K_1} \quad (29)$$

Dabei gilt:

$$W_1(\delta) = \frac{K}{T_1^2 \delta^2 + 2E_1 T_1 \delta + 1}, \quad hW_2(\delta) = \frac{\delta \tau}{1 + \delta \tau_3};$$

$$W_3 \delta = \frac{W_1 K_2 (1 + T_2 P) K_1}{(1 + W_1 W_2) \delta (1 + T_{11} \delta) + W_1 K_2 (1 + T_2 \delta) K_1} \quad (30)$$

Bild 3 zeigt das Strukturdiagramm des Untersystems zur Steuerung in der horizontalen und vertikalen Ebene.



3 Schema des Mechanismus für horizontale und vertikale Aufgabe
 a) Schema des horizontalen Aufgabemechanismus
 b) Schema des vertikalen Aufgabemechanismus

Die Übertragungsfunktion des Systems mit geschlossenem Kreislauf lautet:

$$W_p(\delta) = \frac{K_{cn}}{\delta(T_1^2 \delta^2 + 2E_1 T_1 \delta + 1)}. \quad (31)$$

Die Übertragungsfunktion bestimmt den Fehler:

$$\Delta\varphi(\delta) = \frac{D(\delta)V}{PD(\delta) + K'_{cn}}. \quad (32)$$

Nach dem Hurwitz-Kriterium ist das System instabil, wenn seine Pole in der rechten Halbebene ersetzt werden. Das System wird mit Blick auf die Bedingungen untersucht, ob es den erforderlichen Fehler bei K_{cn} aufweist. Daher wird überprüft, ob sich die Systemkennzahl im verbotenen Bereich des Bode-Diagramms befindet:

$$L(\omega) = 20 \ell g \frac{K'_{cn}}{p} - 20 \ell g (\alpha \cdot p^2 + b_T \cdot p + 1). \quad (33)$$

Die logarithmische Kennzahl des ersten Teils der Gleichung stellt eine gerade Linie mit einer Diagonalen dar, die durch den Punkt

$$\omega = K'_{cn} = 10,5.$$

geht.

Das Bode-Diagramm wird bestimmt durch den Ausdruck:

$$\varphi(\omega) = -v \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}. \quad (34)$$

Die zweite Komponente ist dem Ausdruck ähnlich, der bereits für das horizontale Untersystem betrachtet wurde. Der verbotene Bereich des Diagramms der mittleren Frequenz wird wie folgt dargestellt:

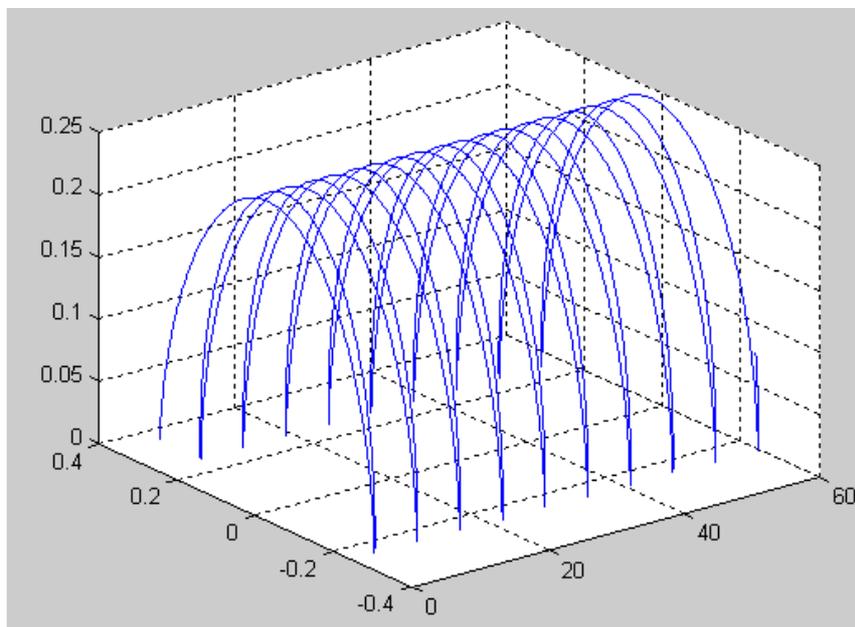
$$20 \lg \frac{M}{M+1} \geq 20 \lg A \cdot (\omega) \geq 20 \lg \frac{M}{M+1},$$

$$12,73 \geq 20 \lg A \cdot (\omega) \geq 0,75. \quad (35)$$

Hier ist ersichtlich, dass sich das Bode-Diagramm nicht im verbotenen Bereich befindet. Die Korrektursegmente für dieses Untersystem sind denen ähnlich, die bereits für das Untersystem der horizontalen Aufgabe akzeptiert wurden.

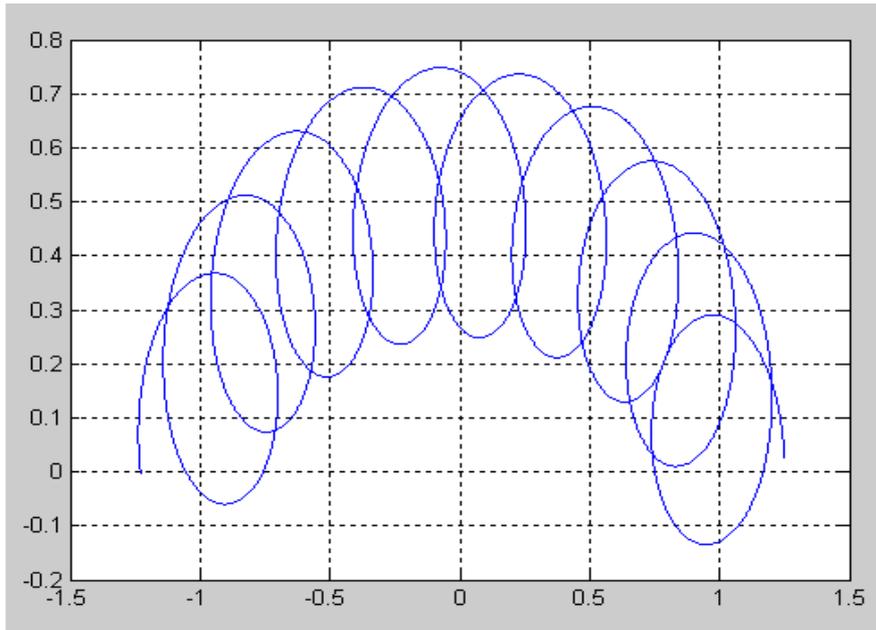
4 Ergebnisse der Simulation

Bild 4 zeigt die Bewegungsbahn des Arbeitsteils des Manipulators, die im MatLab mit den vorher eingestellten Parametern durch Simulation erzeugt wurde.



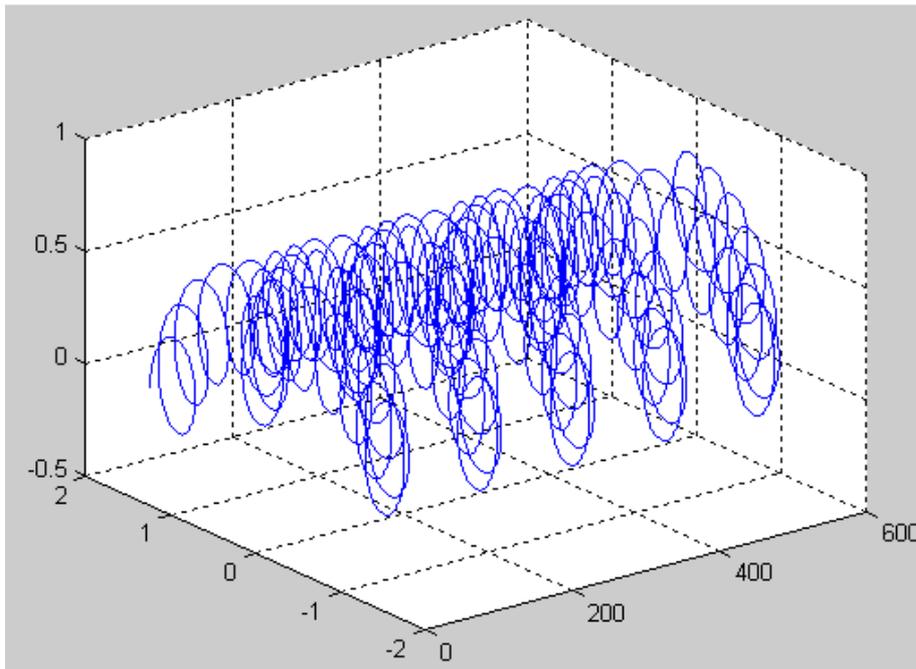
4 Simulationsmodell der Bewegungsbahn des Arbeitsteils des Manipulators

Bild 5 zeigt die Bewegungsbahn in der Frontebene des i-Schneidkopfes des Bedienelements des Manipulators, die im MatLab mit den vorher eingestellten Parametern durch Simulation erzeugt wurde.



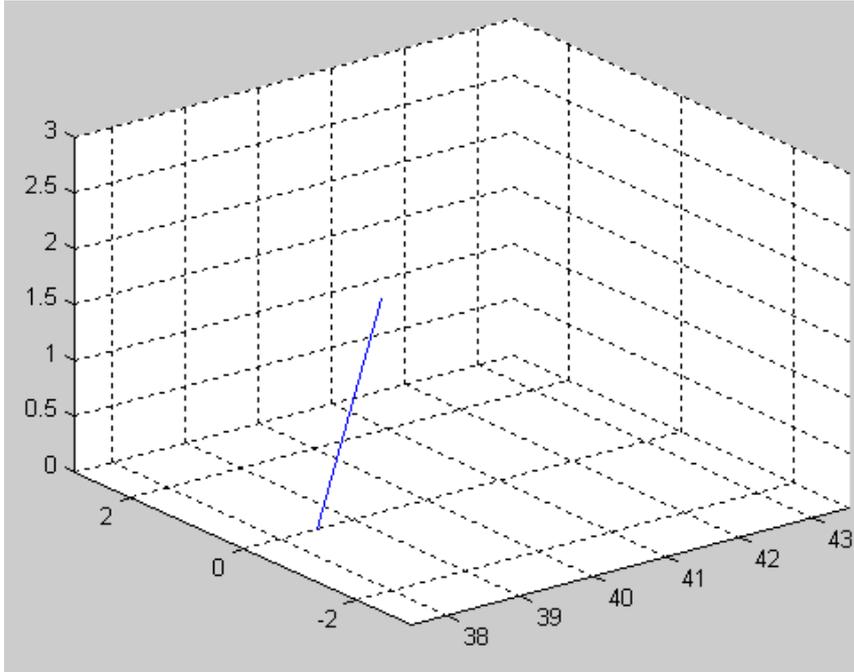
5 Modellierung der Bewegung des i-Schneidkopfes des Bedienelements des Manipulators in der Frontebene

Bild 6 zeigt die Bahn des Schneidkopfes des Bedienelements des Manipulators, wie er sich im Raum bewegt. Auch dies wurde durch Simulation erzeugt, mit den im MatLab vorher eingestellten Parametern.



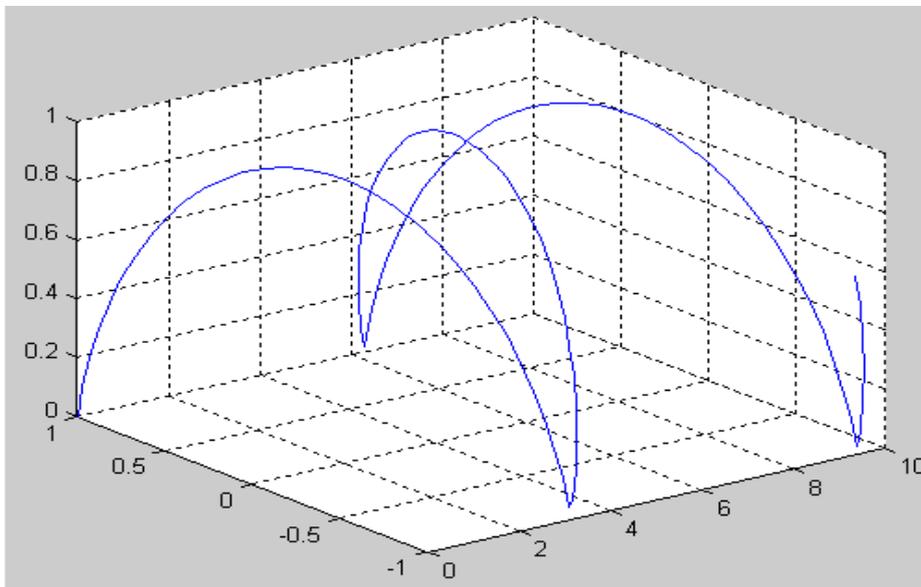
6 Modellierung der Bewegung des i-Schneidkopfes des Bedienelements des Manipulators im Raum

Bei der Verwendung der Funktionsabbildung sind die Bahnen und Animationen der Bewegung des Bedienelements zu erkennen. Bild 7 zeigt eine Animationsaufnahme des Bedienelements, das sich mit den eingestellten Parametern bewegt.



7 Bildschirmkopie der dreidimensionalen Bewegung des schneidenden Bedienelements des Manipulators

Bild 8 zeigt die Bahn des schneidenden Bedienelements mit den vorher eingestellten Parametern des Systems, wie z.B. das Zeitintervall und das gewählte Koordinatensystem.



8 Motion trajectory of the operating part at the preset characteristics

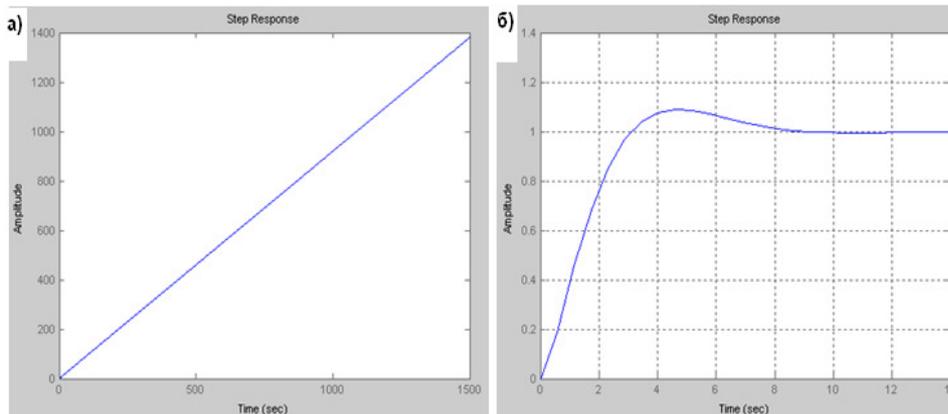
8 Bewegungsbahn des Bedienelements bei vorher eingestellten Kennwerten

5 Analyse der dynamischen Eigenschaften des Steuerungssystems des Manipulators FEM-5 als Teil der Automatisierung

Der Test der Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium zeigte, dass das gegebene System bei positiven Werten von K stabil ist, jedoch nicht bei $K < 2$. Daher wird das Verhalten des Systems in der Nachbarschaft der Stabilitätsgrenzen überprüft, wo die charakteristischen Kennwerte bei $K = 0,1$ und $K = 2$ sind.

Fall mit $K = 0,1$

Bild 9 a zeigt die Übergangszeit des Systems mit offenem Kreislauf, welches nicht stabil ist.

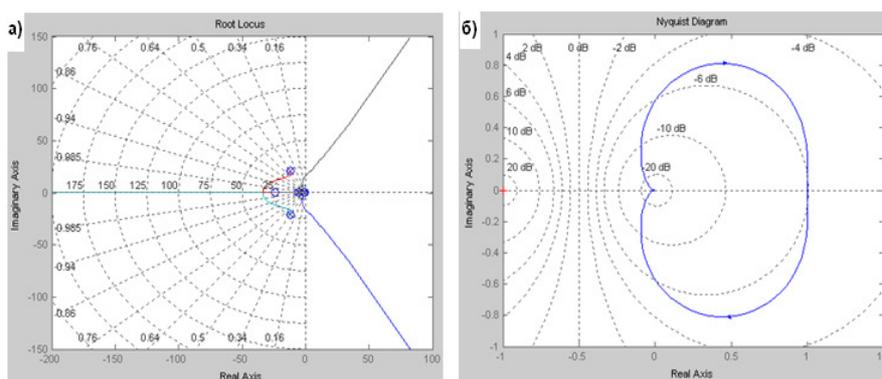


9 Überprüfung der Stabilität der Systeme mit offenem und geschlossenem Kreislauf

- a) Übergangszeit des Systems mit offenem Kreislauf
- b) Übergangszeit des Systems mit geschlossenem Kreislauf

Bild 9 b zeigt die Übergangszeit des Systems mit geschlossenem Kreislauf. Hier tendiert das System im Laufe der Zeit zu einem konstanten Wert, daher ist das geschlossene System stabil – in Bezug auf die charakteristischen Gleichungswurzeln des geschlossenen Systems.

Bild 10 a zeigt das Layout der Wurzeln des geschlossenen Systems. Alle Wurzeln befinden sich in der linken Halbebene der komplexen Ebene. Folglich ist das System nach Lyapunow mit geschlossenem Kreislauf stabil.



10 Überprüfung der Stabilität der Systeme mit offenem und geschlossenem Kreislauf mit Hilfe der Wurzelort- und Nyquist-Diagramme

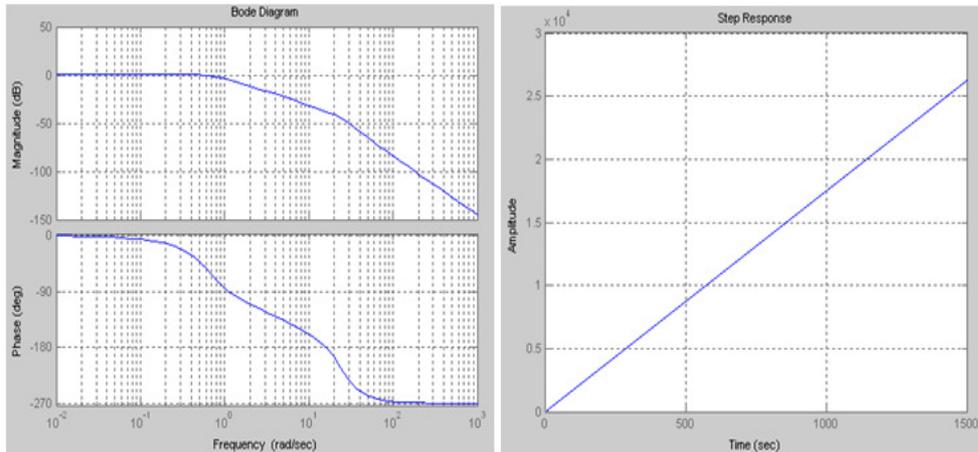
- a) Wurzelort des Systems mit geschlossenem Kreislauf
- b) Nyquist-Diagramm des Systems mit geschlossenem Kreislauf

Bild 10 b zeigt das Nyquist-Diagramm des Systems. Das Diagramm beginnt auf der positiven realen Achse der komplexen Ebene, und mit zunehmender Frequenz tendiert es zum Ursprung der Ebene, deckt jedoch nicht die Punkte -1 und $j 0$ ab. Somit ist dieses System stabil nach dem Nyquist-Kriterium für die Stabilität bei geschlossenem Kreislauf.

Zur Vollständigkeit der korrigierten Systemanalyse erhalten wir die Kennwerte des Bode-Diagramms.

Fall mit $K = 2$

Das Diagramm in Bild 11 a zeigt auch, dass das System beim Wert des Parameters $K = 2$ stabil ist, da die Kurve auf der logarithmischen Skala das Niveau bei 0 Dezibel schneidet, bevor der logarithmische Phasenfrequenzgang das Niveau bei 180° schneidet.

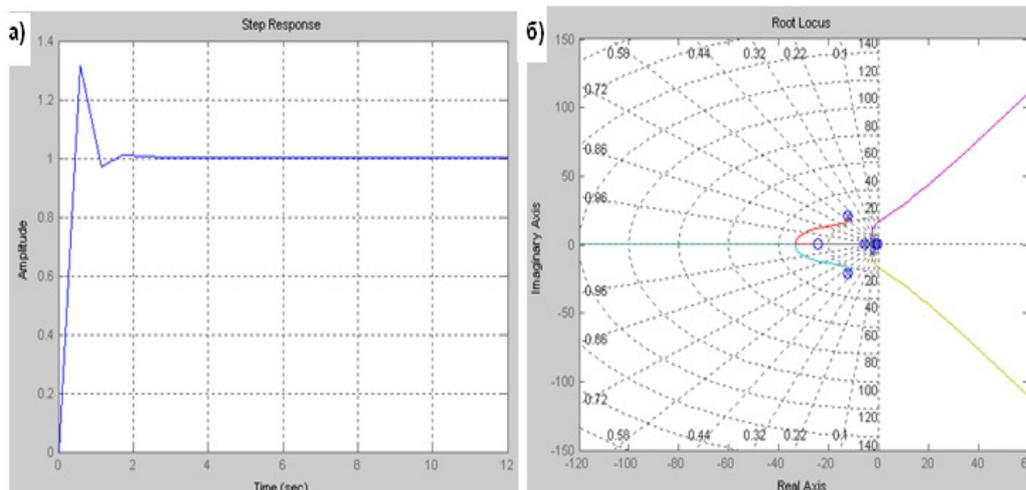


11 Überprüfung der Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium

a) Kennwerte der logarithmischen Amplituden-Phasen-Frequenz b) Übergangsprozess des geschlossenen Systems

Bild 11 b zeigt die Übergangszeit des Systems mit offenem Kreislauf. Das Diagramm dieser Übergangszeit der Sprungantwort zeigt, dass das System mit offenem Kreislauf nicht stabil ist.

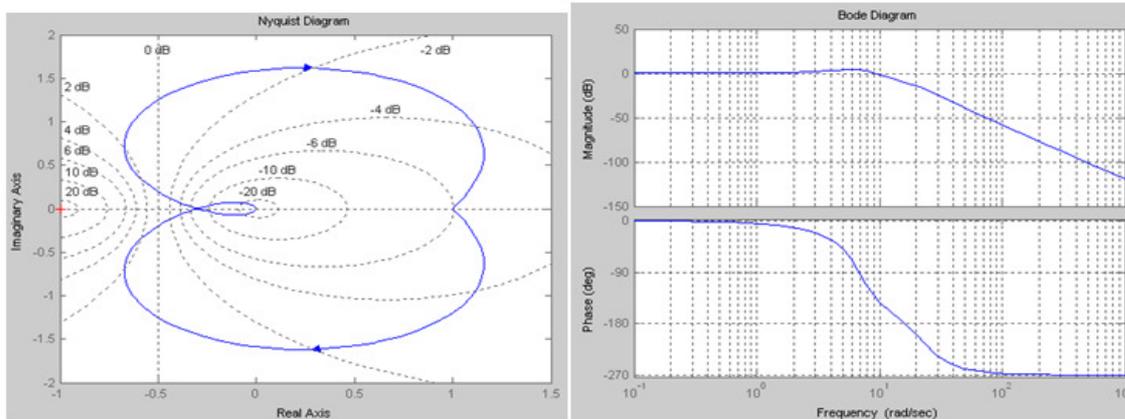
Bild 12 a zeigt die Übergangszeit des Systems mit geschlossenem Kreislauf. Das Diagramm zeigt, dass das System im Laufe der Zeit zu einem konstanten Wert tendiert. Daher ist das System mit geschlossenem Kreislauf stabil.



12 Überprüfung der Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium

a) Übergangsprozess des Systems mit geschlossenem Kreislauf b) Layout der Wurzeln des geschlossenen Systems

Bild 13 a zeigt den Amplituden-Phasen-Kennwert des geschlossenen Steuerungssystems.

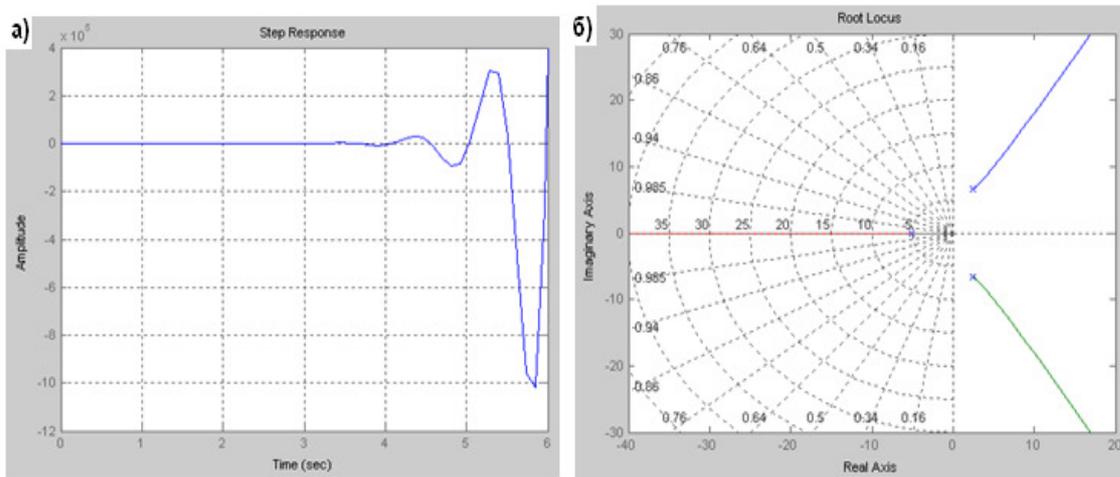


- 13 Überprüfung der Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium
 a) Nyquist-Diagramm des Systems mit geschlossenem Kreislauf
 b) Bode-Diagramm des Logarithmus

Der Amplituden-Phasen-Kennwert beginnt auf der positiven realen Achse der komplexen Ebene, und mit zunehmender Frequenz tendiert er zum Beginn der Koordinaten, deckt aber nicht den Punkt $-1, j 0$ ab. Somit ist dieses System nach dem Nyquist-Kriterium stabil.

Bezüglich der Stabilitätsanalyse des Arbeitsteils in der vertikalen Ebene wurde festgestellt, dass dieses System instabil ist.

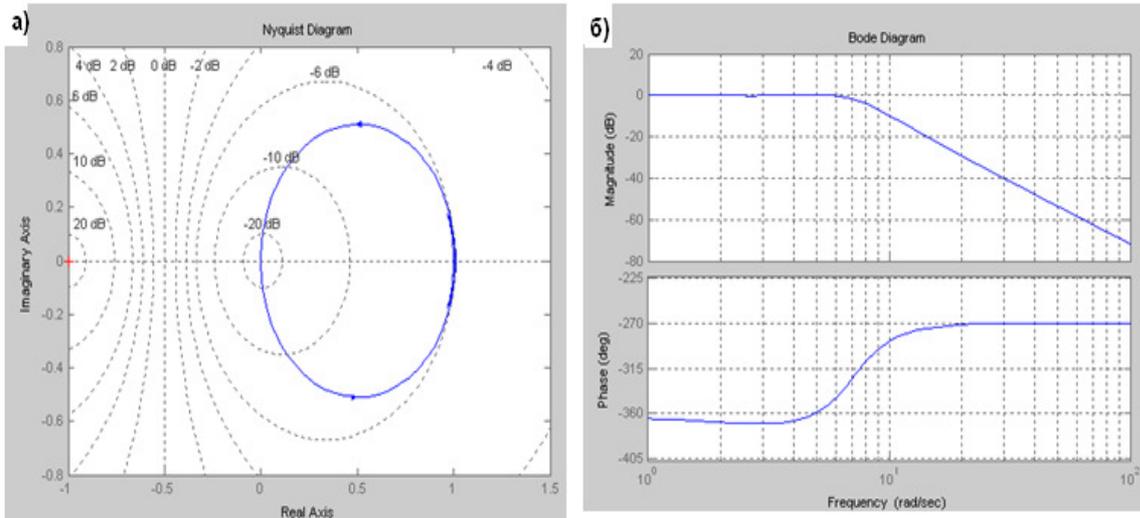
Bild 14 a zeigt den Übergangsprozess des geschlossenen Systems, welches instabil ist.



- 14 Überprüfung der Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium
 a) Übergangsprozess des Systems mit geschlossenem Kreislauf
 b) Layout der Wurzeln des geschlossenen Systems

Bild 14 b zeigt das Layout der Wurzeln des Systems mit geschlossenem Kreislauf. Das Paar der konjugierten Wurzeln befindet sich in der rechten Halbebene der komplexen Ebene. Somit ist das komplexe Steuerungssystem nach Lyapunov instabil.

Anschließend wird das Verhalten des Systems im Frequenzfeld untersucht. Bild 15a zeigt den Amplituden-Phasen-Kennwert des Steuerungssystems.

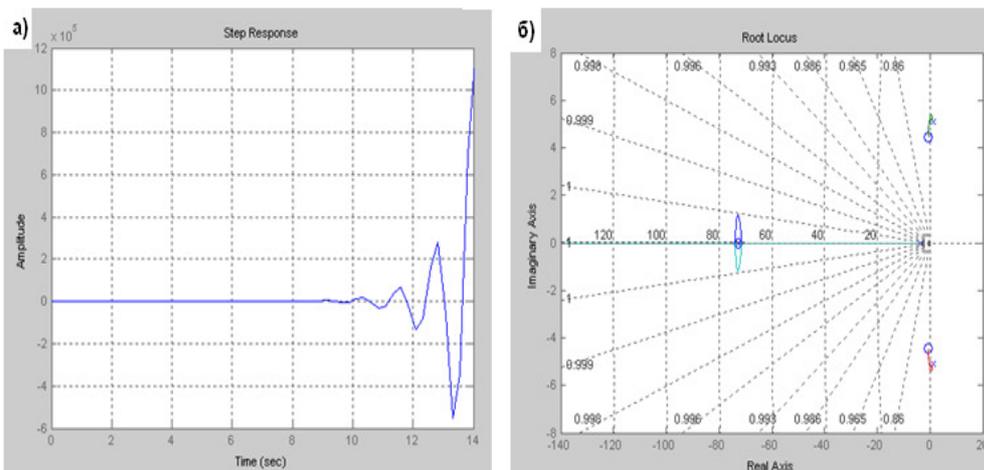


15 Amplituden-Phasen-Charakteristik des Steuerungssystems

- a) Amplituden-Phasen-Charakteristik des Steuerungssystems
 b) Logarithmische Amplituden-Phasen-Frequenz Kennwerte

Zur Vollständigkeit der korrigierten Systemanalyse erhalten wir die Kennwerte der logarithmischen Amplituden-Phasen-Frequenz, die in Bild 15 b dargestellt sind. Dort wird auch gezeigt, dass das System bei den zugeordneten Werten der Parameter instabil ist, da der logarithmische Amplituden-Phasen-Kennwert das Niveau bei 0 Dezibel zu dem Zeitpunkt schneidet, an dem der Phasenfrequenzgang ein Niveau von weniger als -180° hat. Jedoch ist nach dieser Systemüberprüfung, ob der erforderliche Fehler bei c nach dem Check vorhanden ist, und ob er nicht in den verbotenen Bereich des Bode-Diagramms gelangt, zu erkennen, dass das Bode-Diagramm nicht in den verbotenen Bereich gelangt. Die Korrektursegmente für dieses Untersystem sind denen ähnlich, die bereits für das Untersystem der horizontalen Aufgabe akzeptiert wurden.

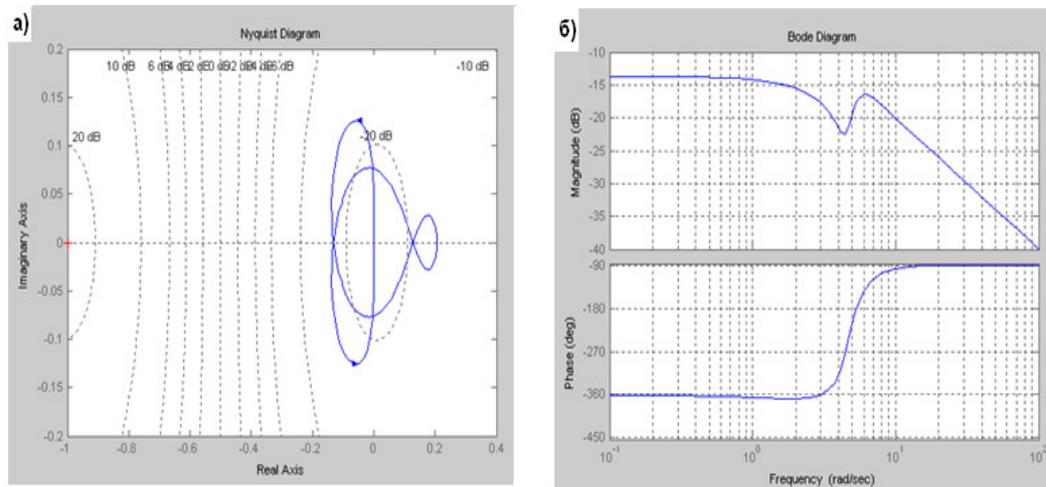
Bild 16 a zeigt den Übergangsprozess des geschlossenen Systems.



16 Übergangsprozess des Steuerungssystems

- a) Übergangsprozess des Systems mit geschlossenem Kreislauf
 b) Wurzelort-Diagramm des Systems mit geschlossenem Kreislauf

Bild 17 a zeigt den Amplituden-Phasen-Kennwert mit dem Nyquist-Diagramm.



- 17 Kennwerte des Steuerungssystems
 a) Nyquist-Diagramm des Steuerungssystems
 b) Bode-Diagramm des Systems

Bild 17 b zeigt die Kenndaten des Bode-Diagramms.

6 Diskussion

Die Lösung der kinematischen Analyse ist ein wichtiger Teil der Robotertechnologie der automatischen Abbaumanipulatoren FEM-5 und auch FEM-6 im Bergbau, weil das Betätigen durch die Bewegung der Schneidkrone ausgeführt werden kann, und weil eine Verbindung mit seinen Teilen im dreidimensionalen euklidischen Raum hergestellt werden kann. Solche Operationen beinhalten die Positionierung im Vortrieb und die Orientierung durch die allgemeine Drehung des Bedienelements des FEM-5.

Es ist bekannt, dass die Schneidkopfkronen des FEM-5 aus starren Segmenten besteht, was eine Verwendung des Geräts für die Beschreibung des festen Körpers gestattet. In der Realität werden alle Arbeitsroboter aus flexiblen Teilen hergestellt. Dennoch werden Methoden dieser Art auf Grund ihrer Komplexität nicht in den Betrieb einbezogen.

Nach Bild 3 stellen wir uns die Schneidkopfkronen als eine Folge starrer Segmente vor, die miteinander verbunden sind durch die Folge N prismatischer oder Drehgelenke. Die unabhängige und freie Bewegung jedes Gelenks kann als Freiheitsgrad betrachtet werden, der mit der unabhängigen Zwangsbewegung des Verschiebungsfelds $q_m = 1, 2, \dots, N$ des FEM-5 im Zusammenhang steht. Andererseits kann die Änderung der Orientierung des Endsegments des FEM-5 durch Veränderungen im sechsdimensionalen Koordinatensystem $x_i = [\rho_x \rho_y \rho_z \theta \varphi \psi]$ des Koordinatensystems T_0^n beschrieben werden, so dass $p = [\rho_x \rho_y \rho_z]^T$ der Vektor der Position für den Beginn des Koordinatensystems T_0^n ist und θ, φ und ψ die Euler'schen Winkel oder Drehwinkel, die Neigung sowie die horizontalen und vertikalen Ausschläge der Umwandlung T_0^n darstellen, die das Koordinatensystem n mit dem grundlegenden Koordinatensystem x_0, y_0, z_0 verbinden.

Die kinematischen Forschungsziele bezüglich der auslegerartigen Mechanismen des automatischen Abbaumanipulators im Bergbau und die Techniken ihrer Lösung haben ihre eigenen Besonderheiten. In der Robotertechnologie werden direkte und umgekehrte Aufgaben der Kinematik gelöst und es wird die kinematische Synthese der Bedingungen der zugeordneten Bildung des Leistungsbereichs ausgeführt. Die auslegerartigen

Arbeitsmechanismen des automatischen Abbaumanipulators im Bergbau enthalten die geschlossenen kinematischen Kreise als Teil der RTC der Frontal-Schrämmaschine FEM-5.

5 Schlussfolgerungen

Kinematische und dynamische Modelle des Manipulators wurden gebaut und erforscht. Dabei wurde ein mathematisches Modell entwickelt für die Berechnung der Schnittkräfte und der Aufgabe der Schneidköpfe des Vortriebs sowie der Belastungen des automatischen Abbaumanipulators einer flankierenden, frontal-selektiven Aktion, die von den kinematischen Parametern möglicher Abbauvarianten an der Kohleabbaufont abhängen. Bestimmt wurden Bahnen des Vortriebs der Spitze des Bedienelements sowie die Bewegung in der Frontebene und der Ebene des i-Schneidkopfes, die durch das Simulationsmodell im MatLab mit den zugeordneten Parametern erhalten wurden. Außerdem wurden Parameter des automatischen Abbaumanipulators unter Berücksichtigung der Bestimmung der Genauigkeit der Schnittflöze aufgeführt.

Es wurde gezeigt, dass bei der Art des Eindringens der Krone in das gebrochene Massiv die Aufgabegeschwindigkeit in einem größeren Maße zunimmt als der Energieverbrauch die Lasten erhöht. Diese verzögerungsfreien Werte hängen linear von der Zeit des Manipulatorbetriebs ab. Beim Modus des Kohletransports durch die gesamte Dicke des Flözes ohne Manipulorausstrag sind die Lasten und der spezifische Energieverbrauch konstant. Dabei nehmen die Lasten der Schwinggeschwindigkeiten des Manipulators zu, während der spezifische Energieverbrauch abnimmt. Bei einer Kombination der Manipulatorschwinggeschwindigkeit mit der Geschwindigkeit des Austrags entlang der Abbauwand verhalten sich die Lasten und der spezifische Energieverbrauch direkt proportional und hängen von der Betriebszeit und der Zunahme der Geschwindigkeit ab.

Eine Analyse und Synthese des Systems für die Steuerung der elektrischen Hydraulikventile durch die Manipulatorantriebe wurden durchgeführt. Der Lastregler und die Systeme der Selbstregelung des FEM-5 wurden sorgfältig ausgewählt, um die Dispersion zu reduzieren und die mathematische Erwartung bis zum Nennwert zu erhöhen. Dies ermöglicht den Einsatz einer Mikroprozessoranlage für die Steuerung des Komplexes der Robotertechnik.

Es gab Ergebnisse der Überprüfung in der Umgebung des MatLab bezüglich der Stabilität nach dem Hurwitz-Kriterium, wobei eine Modellierung der Bewegung des i-Schneidkopfes des Arbeitsteils des Manipulators simuliert wurde. Diagramme der Übergangszeit des Systems mit geschlossenem Kreislauf und der Übergangsfunktion des Untersystems mit geschlossenem Kreislauf für die Steuerung in den vertikalen und horizontalen Ebenen wurden erhalten. Die Kennwerte des Bode-Diagramms, des Nyquist-Diagramms und des Wurzelortdiagramms wurden untersucht.

Die Funktion der Übertragungsdaten wurde berücksichtigt, da die Aufgabespule für das zweistufige Segment des Nachführungsantriebs der Eingabeparameter ist, während der Flüssigkeitsverbrauch der Ausgabeparameter ist. Die Genauigkeit der Reproduktion bei Berücksichtigung der Fehlerwerte ist gegeben. Man erhält die Kennwerte der logarithmischen Amplitude (LAC) für die Bestimmung der Koordinaten der Kontrollstelle mit der Zielstellung der Errichtung eines verbotenen Bereichs beim Betrieb des Korrektursegments. Dadurch erreicht man die Genauigkeit der Bewegung der Arbeitsmechanismen beim Abbau der Wand durch den FEM-5. Die Computer-Modellierung und die numerischen Experimente wurde mit Hilfe der Software des MatLab durchgeführt.

Danksagung

Die Forschungsgruppe dankt allen, die Beiträge zur Studie der Entwicklung des Projekts der Roboterautomatisierung im Kohlebergbau geliefert haben. Dieses Projekt wurde in den Betrieben des Kohlebergbaus von Karaganda/Kasachstan und in der Staatlichen Polytechnischen Universität von Karaganda durchgeführt. Die Forschungsgruppe möchte auch allen Wissenschaftlern und unterstützenden Teams danken, die in die Entwicklung und das Design des Automatisierungsprozesses im Bergbau sowohl an der Akademie als auch in der Industrie eingebunden waren.

References

- [1] *Concept of Development of Coal Mining in Republic of Kazakhstan till 2020: verified by Government of Kazakhstan's Act #644 in 28th June 2008, Astana, p. 23 (in Russian)*
- [2] LI Yunwang, GE Shirong, ZHU Hua, FANG Haifang, GAO Jinke *Mobile platform of roker-type coal mine rescue robot. Mining Science and Technology 2010; 20: 0466-0471*
- [3] Muratbek Arpabekov *Adaptive-programming controil of robotic complex. Saint-Petersburg State University's Scientifc-Technical Vedomosts, Saint-Petersburg, 2010, №2 (97): 63-70 (in Russian)*
- [4] M.Shakhinpur *Basics of Robotics. translated to Russian by S.Dmitriyev, Mir 1990, Moscow, p. 527 (in Russian)*
- [5] Jonathon C. Ralston, Andrew D. *Strange Developing selective mining capability for longwall shearers using thermal infrared-based seam tracking. International Journal of Mining Science and Technology 2013; 23: 47-53*
- [6] Ralston Jonathon, Reid David, Hargrave Chad, Hainsworth David *Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. International Journal of Mining Science and Technology 2014; 24: 305-310*
- [7] T. Ermekov, K. Sholanov, M.Arpabekov *Scientific fundandamental solving and choosing parameters of mining and construction robotic complex, Evero 2009, Almaty, p. 272 (in Russian)*
- [8] Muratbek Arpabekov. *Modelling of FEM-5 working process in analog comptuting systems. Proceedings of Conference "The development of the theory and practice of fundamental and applied sciences", Federal Agency for Education and Penza State University of Architecture and Construction (PGUAS) 2009, Penza (Russia), p. 138-142 (in Russian)*
- [9] N. Bruslenko *Modelling complex systems, Moscow 1978, p.399 (in Russian)*
- [10] Muratbek Arpabekov *Mathematical model of mining shearer and its cutting drum position. Proceedings of International Conference "Actual problems of mathematics, computer science, mechanics and control theory "dedicated to the 60th anniversary of professor, academician R. Biyarova, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering of MES RK (in Russian)*
- [11] Toleukhan Ermekov, Muratbek Arpabekov *Geometric shapes of mining shearer' working parts and its possible ways of control, Proceedings of International Conference dedicated to 45th Anniversarry of TzECI "Modern architecture, construction and transport: current status and prospects and development", L.N. Gumiloyv ENU 2009, Astana, p. 99-102 (in Russian)*
- [12] Toleukhan Ermekov, Muratbek Arpabekov *Mining Machine. By recommendation of Ministry of Education and Science of Republic of Kazakhstan for professional educational institutions, Foliant 2009, p. 372 (in Russian)*