

INTERNATIONAL CONFERENCE: DYNAMICS OF MINING MACHINES  
DYNAMACH '89

Мечислав ЗАЊЦ

Институт Электротехники, Отделение по исследованию  
основ электротехники МП и ПАНЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ

**Резюме.** Тема доклада обнимает результаты исследований автора над проблемой программного управления подъемной установкой в глубоких шахтах. Задачей управления является остановка движущегося с постоянной скоростью скипа на заданном уровне в минимальном интервале времени, при наложении технологических ограничений.

Для исследований принято обратную задачу динамики, исходя из ограничений переменных состояния определено желательный ход скипа. Решая обратную задачу, выполнялся симуляционный эксперимент, в котором определено управляющие напряжение, которое реализует микропроцессорный регулятор.

Представлено диаграммы движения сосуда, диаграммы управляющего напряжения и тока якоря получены при использовании вычислительной графики высокой степени разрешения.

Численные исследования проведены на 16-битовом микрокомпьютере типа IBM-PC/AT.

## 1. ВСТУПЛЕНИЕ

Среди основных направлений технического процесса в горнодобывающих предприятиях большое внимание уделяется концентрации производства, которая ведёт к увеличению мощности шахт, а следовательно к увеличению грузоподъемности подъемных машин. Весьма актуальными задачами теории и практики электропривода подъемных машин является разработка современных систем управления, обеспечивающих повышение их производительности.

Параметры электропривода подъемных машин надо определять из условия обеспечения требуемой производительности подъемной установки с учетом резерва на случай простоя из-за каких либо неисправностей. Сохранение традиционного управления в значительной мере определяется необходимостью выполнения маневров для компенсации неточности остановки сосуда на заданном уровне, или компенсации недопустимого отклонения сосуда от уровня загрузки. Возрастает значение проблемы устранения потерь времени для обеспечения выполнения проектной диаграммы скорости. При увеличении высоты подъема

возникают затруднения вследствие упругой деформации каната, амплитуда которой может превысить допустимую величину отклонения сосуда от уровня.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОГО КАНАТА С ГРУЗОМ

Упругий канат с грузом на конце представляет собой механическую систему с бесконечным числом степеней свободы. Наличие внутреннего трения материала каната, а тоже трения груза о воздух приводит к сравнительно быстрому исчезновению из спектра колебаний системы всех высоких частот. Это обстоятельство делает возможным приближенное рассмотрение каната с грузом на конце как механической системы с одной степенью свободы.

В случае каната постоянной длины, следуя методу Рэлея, можно считать, что все элементы системы совершают гармонические движения с одной и той же фазой. Амплитуды этих движений пропорциональны статическим перемещениям элементов системы под действием груза. Дело сводится к обычному дифференциальному уравнению, которое имеет тот же вид, что в случае лишенного массы каната постоянной длины. Массу груза нужно увеличить тогда на одну треть масс каната согласно с поправкой Рэлея [1].

Непосредственное применение метода Рэлея к канату переменной длины затрудняется из-за сложности граничных условий, а тоже тем, что уравнения Лагранжа второго рода справедливы для систем с постоянной массой в процессе движения [2]. Исходя из уравнения в частных производных

$$\rho \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = E \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$u(0, t) = 0;$$

$$m \cdot \frac{\delta^2 u(1, t)}{\delta t^2} = E \cdot F \cdot \frac{\delta u(1, t)}{\delta x} \quad (2)$$

где:

- $\rho$  — масса единицы длины каната,
- $F$  — площадь его поперечного сечения,
- $E$  — модуль упругости,
- $u = u(x, t)$  — упругое смещение точек каната постоянной длины от положения равновесия, или перемещение какого-либо сечения каната относительно груза по сравнению с положением этого сечения при ненатянутом канате,
- $m$  — масса подвешенного груза,

и имея в виду в дальнейшем искать приближенное решение задачи в виде:

$$u(x, t) = x \cdot \Phi(t) \quad \text{где } \Phi(t) \text{ — функция времени}$$

после исполнения несколько преобразований получим дифференциальное уравнение каната постоянной длины [2]

$$(m + \frac{1}{3} \rho F l) \cdot \frac{d^2 \phi(t)}{dt^2} + \frac{E \cdot F}{l} \cdot \phi(t) = 0 \quad (4)$$

где:

$$\phi(t) = \frac{u(l, t)}{l}$$

В работах [1], [2] показано составление приближенного уравнения движения груза на канате переменной длины. Обозначим через  $x$  расстояние произвольного сечения от груза и через  $\eta$  фактическое расстояние груза от точки схода каната и колеса.

Величина

$$\eta = l + u(l, t) \quad \text{где} \quad l = l(t) \quad (5)$$

является естественной длиной каната, т.е. длиной каната между колесом и грузом в ненатянутом состоянии. Принимая, как выше, что  $u(x, t) = x \cdot \phi(t)$  можно составить приближенное уравнение колебаний груза на канате переменной длины:

$$\begin{aligned} (m + \frac{1}{3} \rho \cdot F \cdot l) \cdot \frac{d^2 \phi}{dt^2} + (m + \frac{1}{2} \rho \cdot F \cdot l) \frac{dl}{dt} \cdot \frac{d\phi}{dt} + E \cdot F \cdot \phi = \\ = (m + \frac{1}{2} \rho \cdot F \cdot l) \frac{dv}{dt} + (m + \frac{1}{2} \rho \cdot F \cdot l) g \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнение (4) можно рассматривать как частный случай уравнения (6) при  $l = \text{const}$ . Правая часть уравнения (6) показывает среднее удлинение каната под действием собственного веса.

### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНАЯ СИМУЛЯЦИЯ ИССЛЕДОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Уравнения и передаточные функции звеньев электромеханической системы подъемной установки определено в результате теоретического анализа их функциональных схем. Была построена тоже простая лабораторная модель с двигателем постоянного тока с постоянными магнитами для которой параметры звеньев определено в результате их идентификации [3].

По передаточным функциям звеньев записано их дифференциальные звена относительно входной и выходной координат. Потом приведено эти уравнения к

системе уравнений в форме Коши. Форма Коши является общепринятой для ряда расчетов, в частности для интегрирования систем нелинейных дифференциальных уравнений основными численными методами Рунге-Кутты, Адамса и их модификациями. Переход от структурных схем с передаточными функциями к дифференциальным уравнениям в форме Коши надо рассматривать как переход к модели в переменных состояниях. Целесообразно выбирать в качестве переменных состояния те переменные, которые допускают непосредственное измерение. Это, как понимает автор, очень важно для удобства построения регуляторов, компенсирующих динамических членов и других. Тогда в качестве входных координат регулятора используются непосредственно переменные состояния без каких-либо преобразующих и вычислительных устройств. По этим координатам определены начальные условия при интегрировании дифференциальных уравнений системы.

Для компьютерной симуляции динамики линейных или нелинейных электромеханических систем используются численные методы, по которым имеется обширная, специализированная литература [4, 5, 6]. Большинство исследованных автором методов основано на разложении искомых функций, описываемых дифференциальными уравнениями в ряд Тейлора в окрестности точки, соответствующей началу каждого шага интегрирования.

Погрешность метода можно определить двумя факторами:

- для решения удерживается отрезок ряда Тейлора а не весь ряд,
- в микрокомпьютерах используется округленные (приближенные) числа .

Погрешность от первого фактора может быть приближенно оценена на основании принципа Рунге. Удобных оценок погрешности от округления в литературе нет.

Что касается выбора шага, то в первом приближении он может производиться исходя из принципа Рунге. Как разработал автор, для обеспечения точности с запасом он может выбираться путём проведения серии расчетов с последовательно уменьшающимся шагом до тех пор пока уменьшение шага приводит к уточнению результата.

Кроме метода Рунге-Кутты в этой работе использовано метод типа "прогноз-коррекция", в особенности метод Адамса-Балфорта как прогноз и метод Адамса-Мульттона как коррекция, которые основываются на применении формул конечных разностей с введением в расчет разностей высоких порядков правой части уравнения состояния, что соответствует учету высших производных в ряде Тейлора. Метод Рунге-Кутты обладает высокой точностью и в отличие от разностных методов типа "прогноз-коррекция" не требует вычисления каким-либо другим методом значений функции для нескольких первых шагов, однако он требует при прочих равных условиях наибольших затрат машинного времени.

В ряде случаев, при интегрировании сложных, нелинейных дифференциальных уравнений, в особенности с разрывными нелинейностями типа зазор, при применении как метода Рунге-Кутты, так и разностных методов могут возникать трудности а особенно нарушения устойчивости вычислительного процесса. Поэтому применяются различные модификации вычислительных методов, например схемы интегрирования жестких систем уравнений [6].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вообще говоря, автор рассматривал в основном нестационарные граничные задачи с непрерывно-дискретными параметрами, являющиеся математическими моделями для широкого класса управляемых динамических систем. Такой системой является подъёмная установка в глубокой шахте, где надо учитывать упругость кахатов.

В промышленных тиристорных электроприводах постоянного тока подъёмных машин внедрены двух и трехконтурные системы подчиненного регулирования. Система исследована автором показана на рис. 1. Основными проблемами исследования динамики таких систем подчиненного регулирования являются:

- поведение систем автоматического управления разных структур,
- влияние на процессы управления приводом разных программ движения,
- оценка влияния настройки регуляторов на динамику системы.

Формирование программы движения нужно обеспечивать постоянство темпа изменения тока двигателя, и тем самым ограничение нагрузки на механическое оборудование подъёмной машины. Целью управления является исключение или ограничение колебаний каната во время разгона движения и остановки. Это должно подтверждаться минимализацией на осциллограммах колебаний с частотой, соответствующей колебаниям механической системы подъёма.

Основной для построения структуры программного устройства является обычно оптимальная диаграмма скорости движения подъёмных сосудов. Так как диаграмма скорости состоит из ряда участков, на которых характер изменения текущего значения скорости в функции времени различный, то при аналитическом описании диаграммы скорости целесообразно отсчет времени начинать с нуля на каждом участке. С учетом этого получены выражения определяющие зависимость скорости от времени на каждом из участков семипериодной, симметричной диаграммы скорости, которые приведены в [7].

В системе исследованной автором формирование программы движения происходит в микропроцессорном регуляторе. Задачей управления является остановка движущегося с постоянной скоростью скипа на заданном уровне в минимальном интервале времени, при наложении технологических ограничений.

Для исследований применена техника компьютерной симуляции. Исходя из условий ограничивающих переменные состояния определяется желательный ход изменения величины связанных с движением сосуда - т.е. программы движения [8].

Решая обратную задачу, автор провел симуляционный эксперимент, в котором определил ход изменения управляющего напряжения, которые следовало бы прикладывать на входе регулятора скорости, чтобы получить желательный график движения сосуда. Микропроцессорный регулятор управляет нестационарным объектом и задача проектирования его алгоритма связана с необходимостью использования изменяющихся во времени параметров закона управления.

Математическая модель объекта представлена в общем случае нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{f}(\underline{x}(t), u(t), \underline{r}(t), t); \quad (7)$$

$$\underline{x}(t_0) = \underline{x}_0;$$

где:

- $\underline{x}(t)$  - вектор состояния,
- $u(t)$  - сигнал микропроцессорного регулятора,
- $\underline{r}(t)$  - вектор параметров состояния,
- $\underline{f}$  - в общем случае нелинейная функция системы,
- $t$  - время.

Пусть требуется построить закон управления:

$$u(\underline{x}) = \underline{c}^T \cdot \underline{H} \cdot \underline{x}(t); \quad \underline{c}^T = \|\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r\| \quad (8)$$

с переменными параметрами  $\underline{c}_k = \underline{c}_k(t)$ .

Задача определения оптимальных значений  $\underline{c}_k^*$  была выполнена автором из условия, чтобы траектория  $\underline{x}(t)$  замкнутой системы определенной уравнениями (7) и (8) возможно в большей степени приближалась к траектории  $\underline{x}_3(t)$  некоторой стационарной системы

$$\dot{\underline{x}}_3(t) = \underline{G}(t) \cdot \underline{x}_3(t); \quad \underline{x}_3(t_0) = \underline{x}_0 \quad (9)$$

Матрица состояния стационарной системы в общем случае переменная во времени. В качестве меры близости траекторий был использован функционал

$$J(\underline{c}) = \int \|\underline{x}(t) - \underline{x}_3(t)\|^T \underline{S} \|\underline{x}(t) - \underline{x}_3(t)\| dt \quad (10)$$

Естественно структура определенно-положительной матрицы  $\underline{S}$  соответствует структуре математической модели управляемой системы показанной на рис. 1, так что минимизация функционала (10) обеспечивает приближение  $\underline{x}(t) \rightarrow \underline{x}_3(t)$ . Искомые параметры представлено в виде:

$$\underline{c}(t) = \underline{\Psi} \cdot \underline{\eta}(t) \quad (11)$$

$$\underline{\eta}(t) = \|\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_m(t)\| \quad (12)$$

$\underline{\Psi}$  -  $r \times m$  - постоянная матрица.

Принимая во внимание зависимость (11) можем записать закон управления в виде:

$$u(\underline{x}) = \underline{\eta}^T(t) \cdot \underline{\Psi}^T(t) \cdot \underline{H} \cdot \underline{x}(t) \quad (13)$$

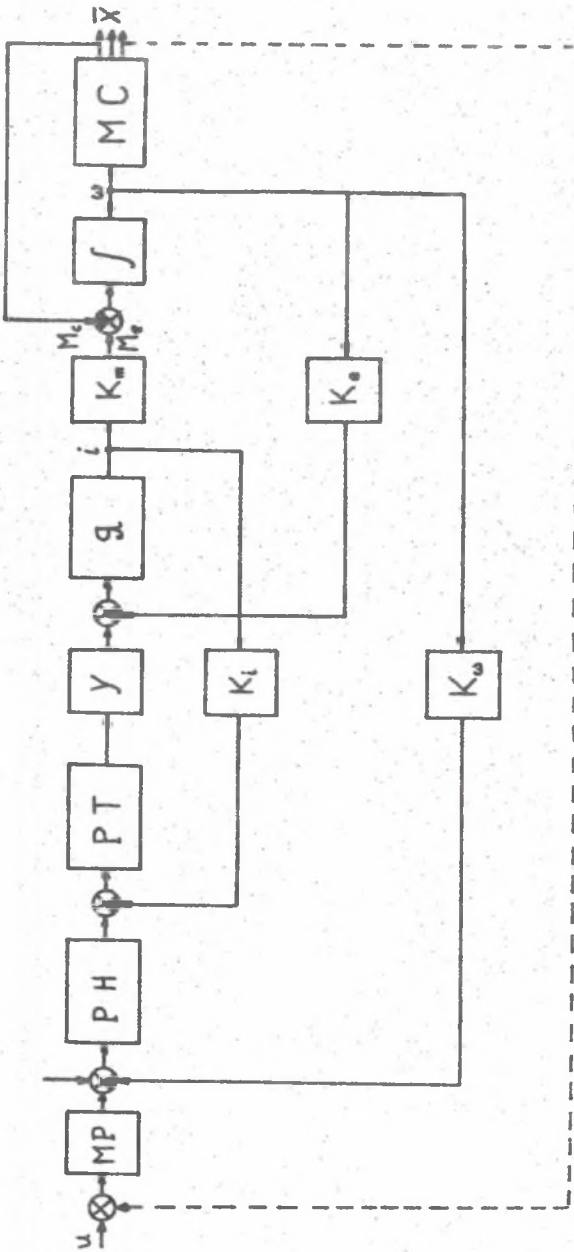


Рис. 1. Общая блок-схема системы управления.

MP - микропроцессорный регулятор, PH - регулятор напряжения, PT - регулятор тока, U - усилитель, Я - якорь двигателя,  $K_m$  - постоянная момента двигателя,  $J$  - интегрирующий член, MC - механическая подсистема,  $K_1$  - постоянная измерения тока,  $K_2$  - постоянная напряжения двигателя,  $K_3$  - постоянная измерения скорости,  $\bar{x}$  - вектор состояния сосуда,  $\mu$  - программа управления,  $M_e, M_0$  - электрический момент двигателя и момент сопротивления соответственно, штриховая линия представляет собой обратную связь от реального состояния сосуда и реализует компенсирующую возмущений

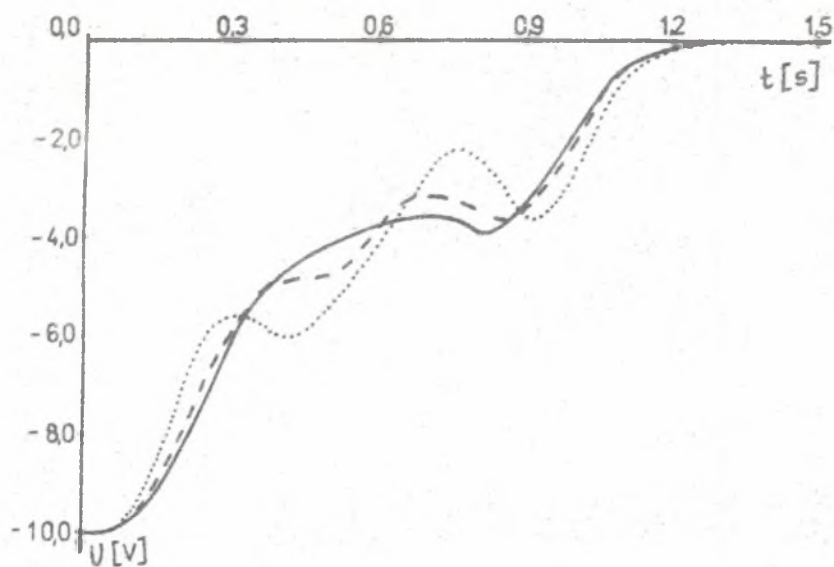


Рис. 2. Диаграмма управляющего напряжения выработанного микропроцессорным регулятором при следующих ограничениях

- $a = 1,0 \text{ m/s}^2$ ;  $\dot{a} = 4,0 \text{ m/s}^3$ ;  $a = 16,0 \text{ m/s}^4$ ;  
 - - - - -  $a = 0,9 \text{ m/s}^2$ ;  $\dot{a} = 3,5 \text{ m/s}^3$ ;  $a = 18,5 \text{ m/s}^4$ ;  
 .....  $a = 0,75 \text{ m/s}^2$ ;  $\dot{a} = 4,0 \text{ m/s}^3$ ;  $a = 27,0 \text{ m/s}^4$ ;

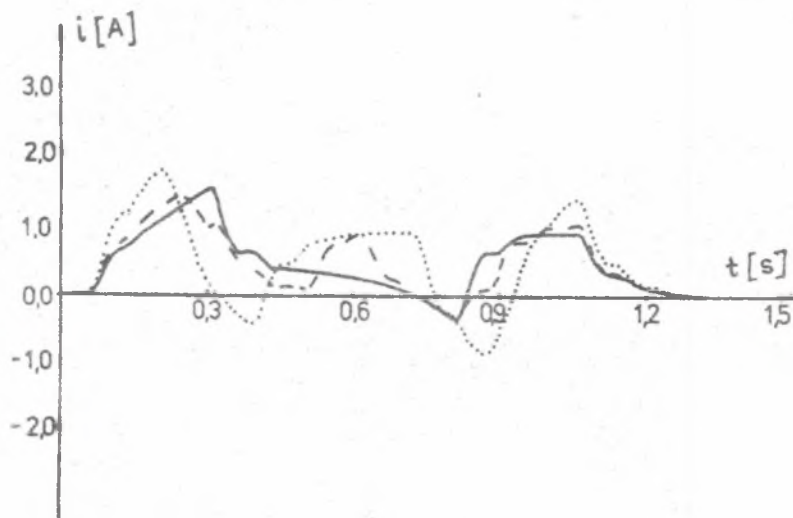


Рис. 3. Соответствующие токи якоря



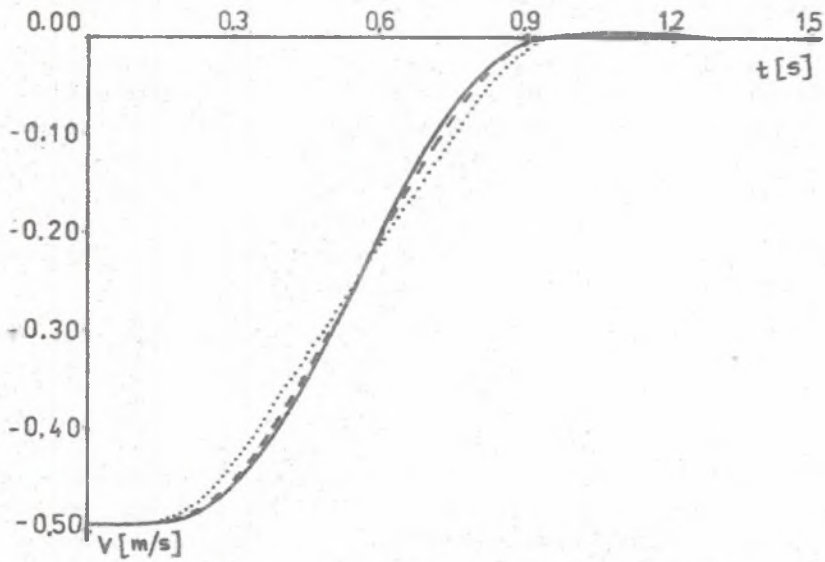


Рис. 4. Диаграммы линейных скоростей сосуда

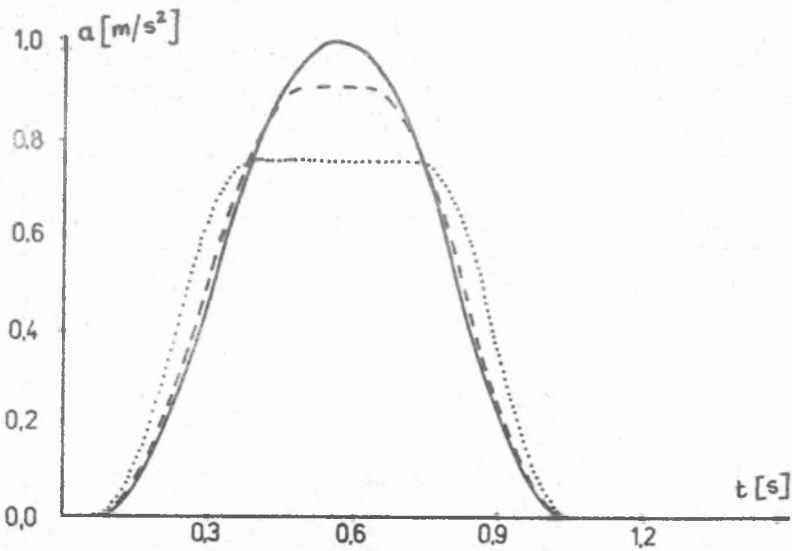


Рис. 5. Диаграммы ускорений сосуда

В зависимости (13) неизвестными являются коэффициенты матрицы  $\Psi$  функционал  $J(C)$  редуцируется в новой функционал  $J(\Psi)$ , а процесс поиска оптимальных значений  $\Psi^*(t) = \|\Psi_{ij}^*\|$  может быть выполнен с помощью численного алгоритма реализованного микропроцессорным регулятором.

Результаты вычислений показано на рисунках. На рис. 2 представлено примерно диаграммы управляющего напряжения в упрощенной лабораторной модели установки. На рис. 3 показано диаграммы соответствующих токов якоря двигателя. На рис. 4 и 5 представлено диаграммы соответствующих линейных скоростей и ускорений сосудов.

Исследования касаются случая замедления и остановки сосуда на заданом уровне при принятии во внимание технологических ограничений на ускорение сосуда, а также на его две производные по времени.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полное представление о работе подъемной установки можно получить только в результате тщательного изучения электромеханических процессов, протекающих в каждом из элементов системы и выяснения взаимной связи этих процессов. Механическая подсистема формирует собственные частоты колебаний которые влияют на динамику систем управления. Оказывается, что электрические цепи источника энергии (двигателя) взаимодействуют с механической подсистемой, так что электромагнитные процессы влияют на движение механической подсистемы и наоборот, упругие колебания в механической системе вызывают изменение токов в электрической цепи двигателя.

Формирование соответствующих диаграмм заданного напряжения позволяет повысить быстродействие контура регулирования скорости и на этой основе выполнить построение более точной системы регулирования. Погрешность воспроизведения регулируемой величины (например скорости сосуда) в режимах разгона и замедления зависят не только от оптимальной настройки регуляторов, но также от программы заданного ускорения и его двух производных по времени. Поэтому в вычислениях диаграммы движения целесообразно предусматривать первоначальный участок улучшения динамики подъемной установки в глубокой шахте.

Численные исследования проведено используя 16-ти битовый персональный компьютер типа IBM-PC/AT.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Савин Г.Н., Горшко О.А.: Динамика нити переменной длины. Изд. А.Н.УССР, Киев, 1962.
- [2] Ишлинский А.Ю.: Об уравнении продольных движений каната (упругой нити) переменной длины. Доклад АН СССР, 1954, м 95, нр 5, с. 939-941.
- [3] Szklarski L., Zajac M., Dziadecki A.: The investigation of Simplified Laboratory Model of Mine Winder with Electric Drive, Archives of Mining Sciences. Vol. 32, Warsaw-Cracow, 1987, Issue 4, p. 581-596.

- [4] Bjorck A., Dahlquist G.: Numerical Methods, Prentice Hall, 1974.
- [5] Stoer J., Bulirsch R.: Einführung in die Numerische Mathematik. Springer Verlag, 1974.
- [6] Gear C.W.: Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, Cliffs, 1971.
- [7] Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М.: Автоматизированный электропривод подъёмных установок глубоких шахт. Москва, Недра, 1983.
- [8] Zajac M.: New Method of Mine Winder Control in Deep Shafts. Prace Instytutu Elektrotechniki. Zeszyt 151, 1988.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Cierpisz

MODELOWANIE CYFROWE UKŁADU PROGRAMOWEGO STEROWANIA  
NAPĘDU MASZYNY WYCIĄGOWEJ

S t r e s z c z e n i e

Tematyka referatu obejmuje problem oscylacji naczyń wydobywczych maszyn wyciągowych spowodowanych elastycznością lin. Dla tłumienia tych oscylacji zaproponowano układ sterowania zawierający sterownik mikroprocesorowy.

Zadaniem układu sterowania programowego jest zatrzymanie poruszającego się ze stałą prędkością naczynia wydobywczego na zadanym poziomie w możliwie jak najkrótszym czasie.

Obliczenia oparte są na zastosowaniu odwrotnego zagadnienia dynamiki. Analityczne rozwiązanie problemu obliczania programu sterowania sprowadza się do budowy ogólnego równania ruchu naczynia, dla którego zadany program jest jednym z wielu możliwych. Numeryczne obliczenie dokładnego przebiegu napięcia sterującego dokonywane jest na drodze symulacji cyfrowej.

Badania symulacyjne przedstawiono przy zastosowaniu 16-bitowego komputera personalnego typu IBM-PC/AT.

DIGITAL MODELLING OF THE MINE WINDER PROGRAMMED CONTROL SYSTEM

S u m m a r y

The paper deals with the problem of longitudinal skip oscillations in deep mines. For a reduction of these undesirable oscillations use the microprocessor controller is proposed. The control system task was to stop a skip moving with constant velocity on a definite level in the shortest time possible.

The analytic solution of the programmed motion is reduced to the construction of equation of motion for which the given programmed motion is one of the possible motions. The calculations are based on the inverse problem of dynamics.