

З.Г. Уалиев<sup>1\*</sup>, Г. Уалиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстан  
\*e-mail: z.ualiyev@mail.ru

## СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ ВЫСОКИХ КЛАССОВ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

### Аннотация

В статье рассматривается модель механизма высокого класса переменной структуры. Несмотря на заметные улучшения возможностей по передаче движения и сил, данные механизмы не применяются широко на практике.

В статье представлен синтезированный механизм высокого класса. Показана структурная схема образования механизма, приводятся результаты синтеза. Показана кинематическая схема механизма, в которой при одном приводе можно создать систему с несколькими рабочими звеньями, обеспечивающими различные технологические операции, что дает возможность на базе одного механизма создавать механизмы-автоматы. В данных исследованиях выполнена разработка методики динамического проектирования механизмов переменной структуры на основе динамического анализа и учета влияния нелинейных факторов на качественную работу машины в целом.

Для исследования движения таких механизмов переменной структуры используется математическое моделирование динамики с разрывными коэффициентами и нелинейными внешними силами.

**Ключевые слова:** механизм переменной структуры, механизм высоких классов, рабочее звено, механическая система, входное звено, привод.

### Аңдатпа

З.Г. Уәлиев<sup>1\*</sup>, Г. Уәлиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

## ДИНАМИКАЛЫҚ ТАЛДАУҒА АРНАЛҒАН ӨЗГЕРІСТІ ҚҰРЫЛЫМНЫҢ ЖОҒАРЫ КЛАСС МЕХАНИЗМДЕРІНІҢ СИНТЕЗІ

Мақалада жоғары деңгейлі айнымалы құрылым механизмiнiң моделi талқыланады. Бұл механизмдер қозғалыс пен қуатты беру қабiлетiнiң айқын жақсаруына қарамастан, iс жүзiнде кеңiнен қолданылмайды.

Мақалада синтезделген жоғары деңгейлi механизм ұсынылған. Механизмнiң түзiлуiнiң блок-схемасы көрсетiлген, синтез нәтижелерi келтiрiлген. Салыстырмалы ықшам кинематикалық схемамен бiр жетектiң көмегiмен әртүрлi технологиялық операцияларды қамтамасыз ететiн бiрнеше жұмыс буындары бар жүйенi құруға болатындығы көрсетiлген, яғни бiр механизм негiзiнде автоматты механизмдер құру мүмкiн болады. Бұл зерттеулерде динамиканы талдауға және тұтастай алғанда машинаның сапасына сызықтық емес факторлардың әсерiн бағалауға негiзделген өзгермелi құрылым механизм динамикалық жобалау әдiстемесiн әзiрлеу жүзеге асырылды.

Осындай өзгермелi құрылым механизмдердiң қозғалысын зерттеу үшiн үзiлiс коэффициенттерi және сызықтық емес сыртқы күштермен динамиканы математикалық модельдеу қолданылады.

**Түйiн сөздер:** өзгермелi құрылым механизмi, жоғары деңгейлi механизм, жұмыс звеносы, механикалық жүйелерi, кiрiс звеносы, жетек.

### Abstract

## SYNTHESIS OF HIGH-CLASS MECHANISMS OF VARIABLE STRUCTURE BASED ON DYNAMIC ANALYSIS

Ualiyev Z.G.<sup>1</sup>, Ualiyev G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

This paper presents the model of a high class variable structure mechanism. These mechanisms have not gained widespread acceptance in practice, despite obvious improvements in the ability to transmit motion and power.

The article presents a synthesized high class mechanism. The block diagram of the formation of the mechanism is shown, the results of synthesis are presented. It is shown that with a relatively compact kinematic scheme, it is possible, with one drive, to create a system with several working links providing various technological operations, that is, on the basis of one mechanism, it becomes possible to create automatic mechanisms. In these studies, the development of a methodology for the dynamic design of the variable structure mechanism based on the analysis of dynamics and

assessment of the influence of nonlinear factors on the quality of the machine as a whole was carried out.

To study the motion of such variable structure mechanism, mathematical modeling of dynamics with discontinuous coefficients and nonlinear external forces is used.

**Keywords:** variable structure mechanism, high class mechanism, working link, mechanical system, input link, drive.

## 1 Введение

В данной работе проводится динамическое проектирование механизмов переменной структуры (МПС), в которых под действием внешних сил и ввиду конструкции передаточных механизмов, самостоятельно меняется структура механизма для достижения требуемых технологических задач. Такие структурные изменения в механизмах позволяют получить совершенно новые технологические эффекты по следующим направлениям:

- синтез механических систем на основе оценки влияния нелинейных факторов и анализа передаточных механизмов на качество работы машинного агрегата.
- исследование динамики механических систем в переходных режимах движения.
- силовая адаптация рабочего органа к переменной технологической нагрузке.
- применение адаптивных приводов в установках горнорудных и металлургических производств и в манипуляционных механизмах робототехнических систем.

## 2 Методология исследования

Вопросы построения математических моделей механических систем и их проектирования, как и динамика механизмов переменной структуры были рассмотрены в работах многих отечественных и зарубежных ученых [1-6]. Механическое движение в механизмах осуществляется вследствие преобразования какого-либо вида энергии в механическую работу. Такое преобразование главным образом осуществляется в двигателе. Так в зависимости от характера преобразуемой энергии различают тепловые, электрические, пневматические и гидравлические двигатели. Преобразование движения, которое осуществляется передаточными механизмами, характеризуется функциями положения

$$\psi_1(\varphi_1), \psi_2(\varphi_2), \dots, \psi_k(\varphi_k), \quad (1)$$

Функция положения на входе рабочего органа имеет вид

$$\theta = \theta(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k). \quad (2)$$

При пренебрежении деформациями главного вала имеем

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_k.$$

В двигателях скорость выходного звена зависит не только от значения входного параметра  $u$ , но и от нагрузки, которая характеризуется величиной момента силы. Эти свойства определяются механическими характеристиками двигателей, обозначающими зависимости между законами изменения во времени входного параметра  $u(t)$ , обобщенной координаты выходного звена и обобщенной движущей силы. Так при решении задач динамики механических систем мы рассматриваем только те свойства двигателей, которые в основном определяют характер их взаимодействия с другими функциональными частями машины. В этом случае статическая характеристика двигателя может быть представлена в форме

$$M_d = M_c(u, \dot{\varphi}) \quad (3)$$

Дополнительно к кривошипу или ротору прикладываются моменты упругих или инерционных сил. При этом движущий момент двигателя считается заданной функцией угловой скорости. В таких двигателях движущий момент зависит не только от координаты выходного звена, но и от скорости.

Статическая характеристика в этом случае представляется в форме

$$M_d = M_c(u, \varphi, \dot{\varphi}) \quad (4)$$

По данным измерения  $\dot{\varphi}$  и  $M_c$  определяется зависимость

$$\dot{\varphi} = f(M_c, u, \varphi) \quad (5)$$

### 3 Результаты исследования

При статических режимах работы, т.е. когда параметры  $M_c, u, \dot{\varphi}$  изменяются достаточно медленно или являются постоянными по величине, статические характеристики двигателей отражают их свойства. Значение скорости выходного звена зависит не только от значений ее производных по времени, но и от значения нагрузки.

В первом приближении такая зависимость может быть учтена введением в характеристику двигателя первой производной от  $M_d(t)$  по времени, которую называют динамической характеристикой двигателя.

$$\dot{\varphi} = f(u, M_d + \tau \dot{M}_d, \varphi) \quad (6)$$

где  $\tau$  - постоянная времени двигателя, которая определяет способность электродвигателя преобразовывать электрическую энергию в механическую. При учете динамических характеристик двигателя, например характеристика асинхронного электродвигателя вида, уравнение движения механизма решается совместно с этим уравнением [7].

$$\omega_d = \omega_d^0 [1 - \nu_d (M_d + \tau \dot{M}_d)] \quad (7)$$

где  $\nu_d$  – коэффициент крутизны статической характеристики,  $\tau$  – электромагнитная постоянная времени.

В классическом курсе механики машин рассматривается наиболее простая динамическая модель, которая основана на допущении о недеформируемости элементов.

Полученные на основе этой модели результаты условно называют «идеальными». При динамическом анализе механических систем, одной и той же механической системе может соответствовать целый ряд динамических моделей [8,9]. В этом случае, как правило, решается задача определения инерционных сил при заданном движении звеньев.

При этом вторую задачу динамики приходится решать лишь при рассмотрении машинного агрегата в целом, например, в связи с определением неравномерности вращения ведущих звеньев [10].

Анализ такой кинетостатической модели дает представление о динамике механизмов, которое может быть достаточным при статическом характере нагружения.

### 4 Дискуссия

Наиболее перспективной, из рассматриваемого класса устройств, представляется конструкция адаптивной, саморегулирующейся передачи на основе зубчатого дифференциального механизма. Саморегулирование, в эксплуатационном режиме, происходит с помощью замкнутого контура, состоящего из зубчатых колес, который накладывает дополнительную связь на движение звеньев механизма.

В работе [11] показано, что эффект силовой адаптации имеет место в идеальной механической системе при отсутствии трения. В этом случае переход системы из одноподвижного в двухподвижное состояние происходит только путем использования инерционных сил. Исследования выполнены на основе положений теории механизмов и машин и законов теоретической механики. Адаптивный привод содержит электродвигатель и адаптивный зубчатый механизм, обладающий свойством самостоятельно, в зависимости от нагрузки, изменять выходную скорость движения. Это свойство адаптации названо саморегулированием. Саморегулирование выполняется только за счет механики и не требует управления.

На рис. 1 показан график изменения тягового момента  $M$  на выходном валу в  $Hm$  в зависимости от частоты его вращения  $n$  в об/мин, который характеризует экспериментальную тяговую характеристику зубчатого адаптивного вариатора. При этом тяговый момент, на выходном валу механизма в эксплуатационном режиме движения, равен переменному моменту сопротивления.

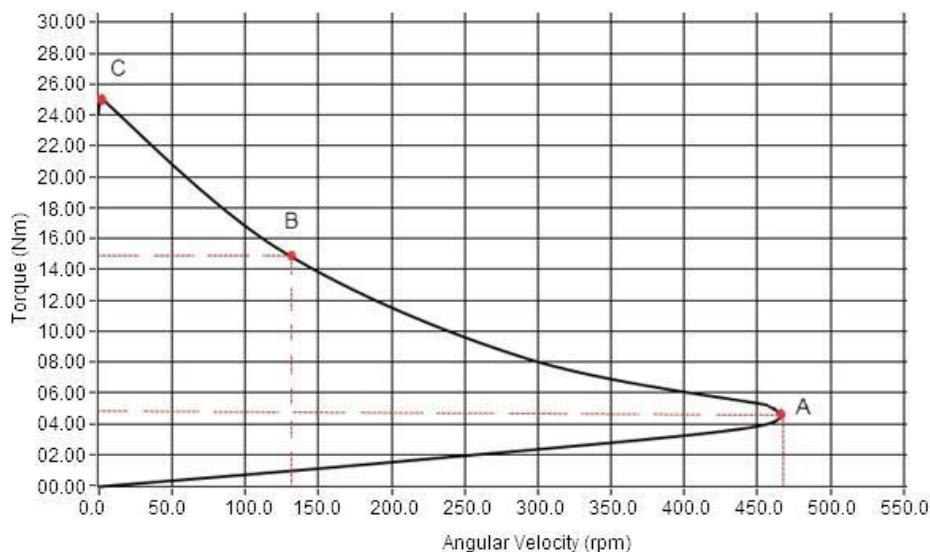


Рисунок 1. Экспериментальная тяговая характеристика зубчатого адаптивного механизма

Влияние крутящего момента на величину угловой скорости: при отсутствии внутренней подвижности в контуре, движение в состоянии с одной степенью свободы –  $OA$ , движение с двумя степенями свободы –  $ABC$  (эксплуатационный режим), промежуточная точка –  $B$ , конец эксплуатационного режима –  $C$  (максимальный момент сопротивления и остановка).

Тяговая характеристика содержит следующие участки.

Кривая  $OA$  – режим пуска (старта) и кривая  $ABC$  – эксплуатационный режим движения. При включении электродвигателя, в режиме пуска, движущий момент быстро изменяется от нуля до номинального значения, которое соответствует мощности электродвигателя.

В режиме пуска (кривая  $OA$ ) механизм движется в состоянии с одной степенью свободы, как одно целое. Относительное внутреннее движение колес внутри замкнутого контура отсутствует. Выходной вал механизма вращается с номинальной скоростью вращения вала электродвигателя. В точке характеристики  $A$  тяговый момент на выходном валу адаптивного механизма равен моменту на валу электродвигателя или входному моменту  $M_{H2} = M_{H1} = 4.80 \text{ Нм}$ .

Эксплуатационный режим движения, кривая  $ABC$ , имеет начало в точке  $A$ , здесь выходной момент сопротивления начинает превышать номинальный тяговый момент  $M_{H2} > M_{H1} = 4.80 \text{ Нм}$ .

Скорость вращения (частота вращения) выходного вала  $n_{H2} = n_{H1} = 460 \text{ об/мин}$  равна частоте вращения входного вала. В этом случае данный механизм переходит в состояние с двумя степенями свободы. Наблюдается силовая адаптация. Происходит самостоятельное изменение частоты вращения выходного вала в обратной зависимости от момента сопротивления. Входная частота вращения и входной момент остаются без изменения и равны соответствующим номинальным значениям параметров электродвигателя.

Адаптивный (саморегулирующий) вибрационный привод представляет собой бесступенчатую, регулируемую зубчатую передачу или замкнутый зубчатый дифференциальный механизм с двумя степенями свободы (рис. 2).

В состав механизма входят стойка  $0$ , входной сателлит  $2$ , входное водило  $H_1$ , блок солнечных колес, центральных зубчатых колес с внешними зубьями ( $1 - 4$ ), блок эпициклических колес, центральных зубчатых колес с внутренними зубьями ( $3 - 6$ ), выходное водило  $H_2$  и выходной сателлит  $5$ . Сателлит  $2$  имеет неуравновешенную массу  $m$ .

Зубчатые колеса  $4-1, 2, 3-6, 5$  образуют замкнутый контур.

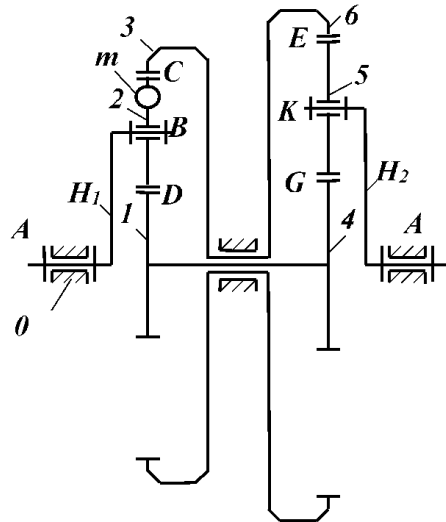


Рисунок 2. Зубчатый адаптивный вибрационный механизм

Благодаря наличию дифференциальной связи внутри замкнутого контура и двух степеней свободы выходное водило  $H_2$  движется вполне определенно со скоростью, обратно пропорциональной выходному моменту сопротивления:

$$\omega_{H_2} = M_{H_1} \omega_{H_1} / M_{H_2}. \quad (8)$$

Уравнение (8) характеризует эффект силовой адаптации выходного звена к переменной нагрузке. Угловые скорости колес, в случае жестких валов, соединяющих колеса 1-4 и 3-6, определяются по формулам [12]:

$$\omega_3 = \frac{\omega_{H_2} (1 - u_{46}^{(H_2)}) - \omega_{H_1} (1 - u_{13}^{(H_1)})}{u_{13}^{(H_1)} - u_{46}^{(H_2)}}, \quad (9)$$

$$\omega_1 = u_{46}^{(H_2)} (\omega_3 - \omega_{H_2}) + \omega_{H_2}, \quad (10)$$

здесь передаточные отношения

$$u_{13}^{(H_1)} = -z_3 / z_1, \quad u_{46}^{(H_2)} = -z_6 / z_4. \quad (11)$$

### Заключение

На данный момент рассматривается вопрос применения адаптивного привода в горнодобывающих отраслях промышленности, в частности, его применения в дробильных устройствах.

При достижении максимального значения переменного сопротивления, адаптивный привод демонстрирует принципиально новое явление. При остановленном рабочем органе, режим движения привода можно назвать стоповым режимом движения. В этот момент электродвигатель будет продолжать движение с прежней скоростью, а подвижная часть модуля остановится. Рабочий режим позволяет преодолеть аварийные ситуации и избежать перегрузки. Выполненный динамический анализ механизмов переменной структуры (МПС) открывает новые возможности для создания адаптивных приводов машин с переменным технологическим сопротивлением.

Список использованной литературы:

- 1 Джолдасбеков У.А. Теория механизмов и машин / У.А. Джолдасбеков. - Алма-Ата.1979. - 260 с.
- 2 Джолдасбеков У.А., Уалиев Г.У., Молдабеков М.М., Тулешов А.К. Моделирование механических систем / У.А. Джолдасбеков, Г.У. Уалиев, М.М. Молдабеков, А.К. Тулешов. - Алма-Ата.1992.- 103 с.
- 3 Бидерман В.Л. Теория механических колебаний: учеб. для вузов / Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. Изд.3, доп. URSS. 2017. - 416 с.
- 4 Антонюк Е.Я. Динамика механизмов переменной структуры / Е.Я. Антонюк Динамика механизмов переменной структуры. Монография. - Киев. Наук. думка. 1988.- 184с.
- 5 Евграфов А.Н. Теория механизмов и машин: учебник / А.Н. Евграфов, М.З. Коловский, Г.Н. Петров. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. - 249 с.
- 6 Семенов Ю.А., Семенова Н.С. Теория механизмов и машин в примерах и задачах. Часть 1 : учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 284 с.
- 7 Уалиев Г., Уалиев З.Г. Математическое моделирование динамики механических систем нелинейными характеристиками / Г.У. Уалиев, З.Г. Уалиев. - Алматы, 2007 г., - 332 с.
- 8 Тарабарин В.Б. Коллекция моделей механизмов МГТУ им. Н.Э.Баумана. Историческая часть 1860-1835 / В.Б. Тарабарин. - М.: Первый том, 2019. - 284 с.
- 9 Смелягин А.И. Структура механизмов и машин: Учебное пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 308 с.
- 10 Бисембаев К., Өміржанова Ж.М., Уәліев З.Ф. Классикалық механика. Сзықты тербелістер теориясы: оқу құралы / К.Бисембаев, Ж.М.Өміржанова, Уәліев З.Ф. Классикалық механика. Сзықты тербелістер теориясы. - Алматы: Абай атындағы ҚазҰПУ, «Улагат» баспасы, 2019. -284 б
- 11 Ivanov K.S., Ualiev G.U., Ualiev Z.G. Dynamics of adaptive-mechanical CVT (gear variator). 7th International Conference on Optimisation of the Robots and Manipulators (OPTIROB 2013). University Politehnica. Bucharest. Romania. Jun. 2013. Applied Mechanics and Materials.
- 12 Иванов К.С., Ярославцева Е.К. Теория механизмов с двумя степенями свободы. Монография. Lambert Academic Publishing. ISBN: 978-3-659-55393-6. Саарбрюкен. Германия. 2014. 171 стр.

References

1. Dzholdasbekov U.A.(1979) Teorija mehanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Alma-Ata. - 260 (In Russian)
2. Dzholdasbekov U.A., Ualiev G.U., Moldabekov M.M., Tuleshov A.K.(1992) Modelirovanie mehanicheskikh sistem [Modeling mechanical systems]. Alma-Ata. 103 (In Russian)
3. Biderman V.L. (2017) Teorija mehanicheskikh kolebanij: ucheb. dlja vuzov [Mechanical vibration theory]. Izd.3, dop. URSS. 416 . (In Russian)
4. Antonjuk E.Ja. (1988) Dinamika mehanizmov peremennoj struktury [Dynamics of variable structure mechanisms]. Monografija. - Kiev. Nauk. dumka. 184 (In Russian)
5. Evgrafov A.N. (2020) Teorija mehanizmov i mashin: uchebnik [Theory of mechanisms and machines]. SPb.: POLITEH-PRESS,. 249 (In Russian)
6. Semenov Ju.A., Semenova N.S. (2015) Teorija mehanizmov i mashin v primerah i zadachah. [Theory of mechanisms and machines in examples and problems. Part 1] Chast' 1: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta. 284 (In Russian)
7. Ualiev G., Ualiev Z.G.(2007) Matematicheskoe modelirovanie dinamiki mehanicheskikh sistem nelinejnymi harakteristikami [Mathematical modeling of the dynamics of mechanical systems by nonlinear characteristics] / G.U. Ualiev, Z.G. Ualiev. - Almaty, 332 (In Russian)
8. Tarabarin V.B.(2019) Kollekcija modelej mehanizmov [Collection of models of mechanisms] MGTU im. N.Je.Baumana. Istoricheskaja chast' 1860-1835 / V.B. Tarabarin. - M.: Pervyj tom., - 284 (In Russian)
9. Smeljagin A.I.(2002) Struktura mehanizmov i mashin: Uchebnoe posobie.[Structure of mechanisms and machines] - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 308 (In Russian)
10. Bisembaev K., Өmirzhanova Zh.M., Ualiev Z.F.(2019). Klassikal'nyj mehanika. Syzykty terbelister teorijasy: oqu құралы / K.Bisembaev, Zh.M.Өmirzhanova, Ualiev Z.F. Klassikal'nyj mehanika. Syzykty terbelister teorijasy[Classical mechanics. Theory of linear oscillations: textbook. - Almaty: Abaj atynday QazYPU, «Ulagat» baspasy, -284 (In Kazakh)
11. Ivanov K.S., Ualiev G.U., Ualiev Z.G. Dynamics of adaptive-mechanical CVT (gear variator). 7th International Conference on Optimisation of the Robots and Manipulators (OPTIROB 2013). University Politehnica. Bucharest. Romania. Jun. 2013. Applied Mechanics and Materials.
12. Ivanov K.S., Jaroslavceva E.K. (2014) Teorija mehanizmov s dvumja stepenjami svobody [Theory of mechanisms with two degrees of freedom] Monografija. Lambert Academic Publishing. ISBN: 978-3-659-55393-6. Saarbrjuken. Germanija. 171 str.