

В. В. Куница, канд. техн. наук, К. Р. Губа

**Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка**

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАШИННОГО АГРЕГАТА С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

Исследован вопрос возможности применения импульсной передачи в приводе машинного агрегата для бесступенчатого регулирования скорости рабочих органов. Рассмотрены режимы работы, силовые зависимости, передаточное отношение, неравномерность вращения валов, динамический и выходной моменты сил на валах в параллелограммной инерционно-импульсной передаче.

Ключевые слова: импульсная передача, режимы работы, рабочие характеристики

Введение

Повышение производительности труда в целом ряде отраслей промышленности возможно путем организации непрерывных технологических процессов, для управления которыми необходимо регулировать скорость рабочих органов машин. Для решения этой задачи особо актуальным и важным является использование бесступенчатого регулирования скорости в связи с оптимизацией и интенсификацией технологических процессов [1, 2, 3].

Импульсные механические передачи являются бесступенчатыми автоматическими механическими передачами по своим природным свойствам. Они предназначены для автоматического бесступенчатого регулирования скоростей и крутящих моментов сил на рабочих органах различных технологических машин.

Отдельным важным вопросом является разработка бесступенчатых коробок скоростей для автомобилей на основе использования импульсных механических передач.

Вопрос о применении импульсных механических систем для указанных целей тормозится из-за недостаточной изученности их рабочих характеристик [1, 3, 4].

Анализ исследований и публикаций

Для бесступенчатого регулирования скорости рабочих органов машин используются электроприводы постоянного тока, гидравлические, пневматические и механические регулируемые передачи. Выбор способа регулирования скорости рабочих органов зависит от анализа конкретного разрабатываемого привода и сводится к нахождению наиболее экономически выгодного решения этой задачи [1, 2, 4].

Импульсной механической бесступенчатой передачей принято называть такую механическую передачу, в которой энергия силового потока с ведущего вала на выходной вал передается силовыми импульсами [2, 3, 6]. В результате при равномерном вращении ведущего вала агрегата значение частоты вращения выходного (рабочего) вала колеблется относительно некоторого среднего значения. Это свойство импульсных передач имеет двойное значение [5, 7]:

- условно отрицательное свойство, которое создает в приводах оборудования дополнительные динамические нагрузки (инерционные силы движущихся масс звеньев);
- положительное свойство, которое делает рабочий орган агрегата активным.

Следует отметить, что это свойство импульсных передач в ряде случаев вызывает нестационарные процессы колебаний в машинах, что негативно влияет на показатели их работы.

Одновременно, на режиме прямого хода $U = 1$ импульсная передача выполняет функцию динамической муфты, значительно снижает вращательные колебания и защищает двигатель агрегата от возникающих перегрузок.

Целесообразно все импульсные механические передачи по принципу их действия и особенностям математического описания разделить на две большие группы [3, 4, 8]:

- инерционные импульсные механические передачи;
- импульсные механические передачи с изменяющимся звеном.

Эффективность применения импульсных передач для бесступенчатого регулирования скорости не вызывает сомнения; например, применение этих передач в металлорежущих станках дает возможность увеличить их производительность. Импульсные механические передачи изменяют крутящий момент и скорость выходного вала на основе использования механизмов свободного хода (МСХ) [5, 8, 9].

Выбор способа регулирования скорости рабочих органов и типа механического привода значительно упрощается при наличии их рабочих характеристик.

Цели и задачи исследования

Цель исследования – разработка рабочих характеристик машинного агрегата с импульсной передачей.

Для достижения указанной цели следует решить такие задачи:

- составить математическую модель машинного агрегата с импульсной передачей;
- определить величину импульса момента сил, который передается на выходной (рабочий) вал за один цикл работы;
- установить силы, определяющие величину импульса момента сил;
- определить функцию передаточного отношения импульсной передачи.

Математическая модель импульсной передачи

Импульсная механическая передача содержит голономные стационарные связи. Кинетическая энергия такого агрегата будет однородной квадратичной функцией обобщенных скоростей [7, 10, 11]:

$$T = T_1 + 0,5 \cdot (A_1 \cdot \dot{\alpha}^2 + 2 \cdot A_2 \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi} + A_3 \cdot \dot{\psi}^2 + I_3 \cdot \dot{\phi}^2 + I_4 \cdot \dot{\eta}^2 + I_5 \cdot \dot{\beta}^2), \quad (1)$$

где T_1 – кинетическая энергия двигателя;

$\dot{\alpha}, \dot{\psi}, \dot{\phi}, \dot{\eta}, \dot{\beta}$ – обобщенные скорости ведущего, промежуточного, грузового звеньев и выходных рабочих органов прямого и обратного хода соответственно;

I_3, I_4, I_5 – массовые параметры промежуточного звена и выходных рабочих органов;

A_1, A_2, A_3 – переменные коэффициенты уравнения.

$$A_1 = I_1 + nma^2 + \left(\frac{a}{e} + k\right)^2 nI_g + 2nmah \cdot \left(\frac{a}{e} + k\right) \cos \psi, \quad (2)$$

$$A_2 = nmab + \left(\frac{a}{e} + k\right) \cdot \left(\frac{b}{e} - k\right) nI_g + nmh \cdot \left(\frac{2ab}{e} + (b-a)k\right) \cos \psi, \quad (3)$$

$$A_3 = I_2 + nmb^2 + \left(\frac{b}{e} + k\right)^2 nI_g + 2nmbh \cdot \left(\frac{b}{e} + k\right) \cos k. \quad (4)$$

Потенциальная энергия упругих элементов механизмов свободного хода будет равняться квадратичной функции угла поворота промежуточного звена [1, 10, 12]:

ству передача значительно снижает пиковые нагрузки на МСХ, импульсный механизм и приводной двигатель передачи.

Импульс момента сил, который передается на выходной вал, за один цикл работы механизма равен:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} M \cdot dt, \quad (11)$$

где M – вращающий момент инерционных сил, действующий на выходной вал со стороны промежуточного вала во время их совместного движения;

t_1, t_2 – время начала и окончания совместного движения выходного и промежуточного валов импульсной передачи.

Перейдем под знаком интеграла к переменной угла ψ поворота грузового звена

$$d\psi = \dot{\psi} \cdot dt; \quad \dot{\psi} = \dot{\alpha} - \dot{\beta}. \quad (12)$$

Таким образом, будем иметь

$$S = \int_{\psi_0}^{\pi} \frac{M}{\dot{\alpha} - \dot{\beta}} \cdot d\psi, \quad (13)$$

где ψ_0 – угол, который соответствует началу совместного движения выходного и промежуточного валов импульсной передачи;

$\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ – угловые скорости ведущего и выходного валов.

Для упрощения объяснений пренебрежем изменением угловых скоростей валов. При таком допущении имеем две инерционные силы P_1 и P_2 , которые приложены в центре тяжести S грузового звена, модульное значение которых равно [7, 10, 14]:

$$P_1 = m \cdot a_B^n, \quad (14)$$

$$P_2 = m \cdot a_{SB}^n, \quad (15)$$

где a_B^n, a_{SB}^n – нормальные ускорения точки B и точки S при движении вокруг точки B .

Анализ функционирования такого машинного агрегата показывает, что каждый из МСХ может быть либо замкнутым, либо разомкнутым. Таким образом импульсная механическая передача имеет четыре различных режима работы [1, 3, 5]:

1) выбега, когда оба МСХ разомкнуты. На этом режиме скорость выходного маховика и промежуточного вала будет уменьшаться. Угловая скорость грузового звена, ведущего вала и двигателя будет увеличиваться;

2) замыкания, когда корпусный МСХ замыкается на корпус, а выходной МСХ остается еще разомкнутым. На этом режиме скорость выходного маховика продолжает уменьшаться, а скорость промежуточного вала будет равняться нулю. Угловая скорость грузового звена, ведущего вала и двигателя будет увеличиваться;

3) рабочий, когда выходной МСХ замыкается и движение передается на рабочий орган для выполнения технологического процесса. При определенных технологических условиях третий режим может перейти на режим динамической муфты;

4) стоповый, когда оба МСХ замкнуты. На этом режиме промежуточный вал и выходной маховик замыкаются между собой и соединяются с корпусом передачи. Импульсный механизм переходит на режим кинематической муфты и защищает двигатель от перегрузок.

Следовательно, процесс работы такого машинного агрегата за любой промежуток времени можно рассматривать как чередование указанных выше режимов. При этом последовательность чередования указанных режимов носит случайный характер.

Для исследования режимов движения импульсной передачи, введены два вспомогательных символа Δ_1 и Δ_2 , которыми характеризуется состояние МСХ.

Когда $\Delta_1 = 1$ – корпусный МСХ включен, если $\Delta_1 = 0$ – корпусный МСХ выключен. Когда $\Delta_2 = 1$ – выходной МСХ включен, если $\Delta_2 = 0$ – выходной МСХ выключен. Очевидно, что каждому режиму соответствует определенная комбинация символов Δ_1 и Δ_2 . Таблица 1 дает полную характеристику этих комбинаций.

Таблица 1 – Режимы движения и комбинации символов Δ_1 и Δ_2

Режим	Название режима движения	Значение символов	
		Δ_1	Δ_2
I	Режим разгона	$\Delta_1 = 0$	$\Delta_2 = 0$
II	Режим включения корпусного МСХ	$\Delta_1 = 1$	$\Delta_2 = 0$
III	Режим включения выходного МСХ (рабочий режим)	$\Delta_1 = 0$	$\Delta_2 = 1$
IV	Режим включенных МСХ (стоповый режим)	$\Delta_1 = 1$	$\Delta_2 = 1$

Основными рабочими характеристиками машинного агрегата являются:

- диапазон передаточных отношений U_M ;
- неравномерность вращения выходного рабочего вала δ_α ;
- неравномерность вращения ведущего вала (вала электродвигателя) δ_β ;
- функция изменения крутящего момента выходного вала.

Согласно определению передаточного отношения для машинного агрегата с импульсной передачей имеем зависимость

$$U_M = A_{II} \frac{\alpha_{CP}}{\beta_{CP}}, \quad (16)$$

где A_{II} – кинематический параметр импульсной передачи, который зависит от конструктивных элементов зацепления.

На основе теоремы о среднем значении функции имеем:

$$\dot{\alpha}_{CP} = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} \dot{\alpha}(t) dt = \frac{1}{t_1} \cdot [\alpha(t_1) - \alpha(0)], \quad (17)$$

$$\dot{\beta}_{CP} = \frac{1}{t_1} \cdot \int_0^{t_1} \dot{\beta}(t) dt = \frac{1}{t_1} \cdot [\beta(t_1) - \beta(0)]. \quad (18)$$

Определим длину одного периода. На установившемся режиме движения изменение угловой скорости вала электродвигателя вообще не превышает 3 %. Таким образом, время одного периода рассчитываем по формуле [10, 14]:

$$t_1 = \frac{2\pi}{a_{11}n_1\alpha(1-\mu^2vE)} = \frac{2\pi}{a_{11}n_1h}. \quad (19)$$

Анализ зависимостей (17)–(19) позволяет сказать, что характеристика передаточного отношения является линейной. Для построения диапазона передаточного отношения U_M следует определить его максимальное значение, которое соответствует максимальному параметру эксцентриситета грузового звена.

Неравномерность вращения ведущего и выходного валов следует оценивать по коэффициенту неравномерности, которые имеют вид:

$$\delta_\alpha = \frac{\dot{\alpha}_{\max} - \dot{\alpha}_{\min}}{\dot{\alpha}_{CP}}, \quad (20)$$

$$\delta_\beta = \frac{\dot{\beta}_{\max} - \dot{\beta}_{\min}}{\dot{\beta}_{CP}}. \quad (21)$$

Для определения максимальных $\dot{\alpha}_{\max}$, $\dot{\beta}_{\max}$ и минимальных $\dot{\alpha}_{\min}$, $\dot{\beta}_{\min}$ значений угловых скоростей следует использовать зависимости, которые приведены в [4].

Переменность крутящего момента вала двигателя отражает коэффициент неравномерности

$$\delta_M = \frac{\dot{M}_{\max} - \dot{M}_{\min}}{\dot{M}_{CP}}. \quad (22)$$

Следует заметить, что на отрезке времени от 0 до t_1 график функции момента имеет выпуклый вид, а увеличение числа рабочих тел корпусного МСХ неравномерность момента двигателя уменьшает. Оценим динамическую напряженность машинного агрегата по напряженности корпусного МСХ. Пренебрегая в амплитудах моментов гармоническими составляющими колебаний, получим функцию момента

$$M(t) = \mu(L_1 \cos \omega t + L_2 \sin \omega t). \quad (23)$$

Рассмотрим третье уравнение системы и запишем его в виде

$$a_1^{-1} \left[M - (I_\partial + a_{11}^2 (I_0 + A_1)) \right] \cdot \ddot{\alpha} = N_0 \left[a_{12} M_c + (I_\beta + a_{12}^2 I_n + I_0) \right] \cdot \ddot{\beta}. \quad (24)$$

Это уравнение имеет слева динамический вращающий момент сил M_{II} , действующий на ведущем валу, а справа – вращающий момент сил M_B , действующий на выходном валу передачи [1, 5, 9]:

$$M_{II} = a_1^{-1} \left[M - (I_\partial + a_{11}^2 (I_0 + A_1)) \right] \cdot \ddot{\alpha}, \quad (25)$$

$$M_B = N_0 \left[a_{12} M_c + (I_\beta + a_{12}^2 I_n + I_0) \right] \cdot \ddot{\beta}. \quad (26)$$

Момент сил, действующий на корпусный МСХ, равен разности моментов

$$M_{KII} = M_B - M_{II}. \quad (27)$$

Выводы

Разработана математическая модель импульсной передачи при условии, что передача содержит голономные стационарные связи.

Для характеристики состояния МСХ введено два вспомогательных символа Δ_1 и Δ_2 . Составлена таблица комбинаций символов, что позволяет наметить пути моделирования процесса работы машинного агрегата.

Зависимости (25) и (26) показывают, что с увеличением угловой скорости выходного вала средний крутящий момент сил передачи автоматически и непрерывно падает. И наоборот, снижение угловой скорости выходного вала приводит к автоматическому росту среднего крутящего момента сил передачи.

Рассмотрены рабочие характеристики и получены математические выражения моментов сил и сил, которые действуют на элементы передачи.

Установлено, что использование бесступенчатых импульсных механических передач в технологических машинах является целесообразным.

Список литературы

1. Леонов, А. И. Инерционные автоматические трансформаторы вращающего момента / А. И. Леонов. – М. : Машиностроение, 1978. – 224 с.
2. Кропп, А. Е. Приводы машин с импульсными вариаторами / А. Е. Кропп. – М. : Машиностроение, 1988. – 144 с.
3. Мальцев, В. Ф. Механические импульсные передачи / В. Ф. Мальцев. – М. : Машиностроение, 1978. – 367 с.
4. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1989. – 719 с.
5. Леонов, А. И. Микрохраповые механизмы свободного хода / А. И. Леонов. – М. : Машиностроение, 1982. – 219 с.
6. Пронин, Б. А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы) / Б. А. Пронин, Г. А. Ревков. – М. : Машиностроение, 1980. – 320 с.
7. Добронравов, В. В. Основы аналитической механики / В. В. Добронравов. – М. : Высшая школа, 1976. – 263 с.
8. Вульфсон, И. И. Динамические расчеты цикловых машин / И. И. Вульфсон. – Л. : Машиностроение, 1976. – 328 с.
9. Коловский, М. З. Динамика машин / М. З. Коловский. – Л. : Машиностроение, 1989. – 263 с.
10. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : ГИФМЛ, 1961. – 576 с.
11. Пейсах, Э. Е. Система проектирования плоских рычажных механизмов / Э. Е. Пейсах, В. А. Нестеров. – М. : Машиностроение, 1988. – 232 с.
12. Litvin, F. L. Gear Geometry and Applied Theory / F. L. Litvin, A. Fuentes. – Cambridge, U. K. : Cambridge University Press, 2004. – 800 p.
13. Kolovsky, M. Z. Advanced Theory of Mechanisms and Machines / M. Z. Kolovsky, A. N. Evgrafov. – Berlin : Verlag ; New York : Springer, 2000. – 800 p.
14. Stölzle, K. Freilaufkupplungen. Berechnung und Konstruktion / K. Stölzle, S. Hart. – Berlin, 1971. – 169 s.

В. В. Куница, К. Р. Губа

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

Рабочие характеристики машинного агрегата с импульсной передачей

Исследован вопрос возможности применения импульсной передачи в приводе машинного агрегата для регулирования скорости рабочих органов. Бесступенчатое регулирование скорости рабочих органов является наиболее оптимальным вариантом решения задачи по повышению эффективности производства. Импульсные механические передачи являются бесступенчатыми автоматическими механическими передачами по своим природным свойствам. Они предназначаются для автоматического бесступенчатого регулирования скоростей и крутящих моментов сил.

Разработана математическая модель импульсной передачи при условии, что передача содержит голономные стационарные связи. Для записи дифференциальных уравнений движения импульсной передачи на всех режимах работы используются уравнения Лагранжа. Выяснено, что импульсная механическая система имеет пять степеней подвижности. Дифференциальные уравнения движения имеют вид системы из пяти уравнений, для решения которых необходимо применять методы динамического моделирования. Анализ функционирования такого машинного агрегата показывает, что каждый из МСХ передачи может быть либо замкнутым, либо разомкнутым. Таким образом, импульсная механическая передача имеет четыре различных режима работы.

Для исследования режимов движения импульсной передачи предложено ввести два вспомогательных символа Δ_1 и Δ_2 , которыми характеризуется состояние МСХ. Составлена таблица комбинаций вспомога-

тельных символов, что позволяет наметить пути моделирования процесса работы машинного агрегата. Основными рабочими характеристиками являются: диапазон передаточных отношений; неравномерность вращения рабочего вала; функция изменения крутящего момента сил на выходном валу. Записаны уравнения динамических вращающих моментов сил, действующих на ведущем и выходном валах передачи. Предложены математические записи коэффициентов неравномерности крутящего момента, вращения входного и выходного валов. На установленном режиме движения изменение угловой скорости вала электродвигателя не превышает 3 %. Определена длина времени одного периода колебаний. Выяснено, что момент сил, действующий на корпусном МСХ, равен разности моментов сил, действующих на ведущем и выходном валах. Анализ математических зависимостей для угловых скоростей позволяет сказать, что характеристика передаточного отношения носит характер линейной функции.

Использование бесступенчатых импульсных передач для регулирования скоростей рабочих органов в приводах машинных агрегатов является целесообразным.

ИМПУЛЬСНАЯ ПЕРЕДАЧА, РЕЖИМЫ РАБОТЫ, РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

V. V. Kunitsa, K. P. Guba

Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Operating Characteristics of the Machine Aggregate with Pulse Transmission

The question of the pulse transmission application in the drive of the machine aggregate for speed regulation of movable objects is investigated. Infinitely adjustable speed of movable objects is the most optimal task solution and productive efficiency improvement. Mechanical pulse transmissions are stepless automatic mechanical transmissions on their nature. They are intended for infinite speed control and torque control.

The mathematical model of pulse transmission is developed, provided that transmission has holonomic scleronomic constraints. For differential equations of the pulse transmission movement at all modes of operation Lagrange equations are used. It is clarified that pulse mechanical system has five motion freedoms. Differential equations of motion are of the system form from five equations, for their solution it is necessary to apply methods of dynamic simulation. The analysis of such machine aggregate functioning shows that each unit of the free-wheel clutch mechanism can be either closed or open so pulse mechanical transmission has four different modes of operation.

For investigation of the pulse transmission movement it is suggested to introduce two auxiliary symbols Δ_1 and Δ_2 . They will characterize the state of the free-wheel clutch mechanism. The table of the auxiliary symbol set is made. It allows to outline modelling ways of the machine aggregate working process. The main operating characteristics are span of speed ratios; irregularity of the working shaft revolutions; torque curve function on the output shaft. The equations of dynamic driving torques on the driving shaft and output shaft are recorded. Mathematical recording of torque irregularity coefficients, driving and output shaft revolution irregularity coefficients are suggested. During steady state of motion instability of the electric motor shaft angular velocity does not exceed 3 %. The time of one oscillation period is determined. It is clarified that torque on the body of free-wheel clutch mechanism is equal to the difference of torques on driving and output shafts. The analysis of mathematical dependences for angular velocities allows to say that the characteristic of the gear ratio is of linear function character.

Stepless mechanical transmissions for speed regulation of movable objects in the drives of machine aggregates are rational.

PULSE TRANSMISSION, MODE OF OPERATION, OPERATING CHARACTERISTICS

Сведения об авторах:

В. В. Куница

Телефон: +38 (095) 870-40-15

Эл. почта: kf-bdmdm@adidonntu.ru

К. Р. Губа

Телефон: +38 (095) 427-22-41

Эл. почта: kf-bdmdm@adidonntu.ru

Статья поступила 10.12.2015

© В. В. Куница, К. Р. Губа, 2018

Рецензент: А. И. Севостьянов, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»