

## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАШИН С МЕХАНИЗМАМИ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Динамический анализ механизмов и машин является важнейшим этапом создания машин различного назначения. В настоящее время существуют множество методов динамического анализа и синтеза механизмов, которые используются в зависимости от характера изменения приведенных сил и моментов. Так, например, закон изменения скорости механизма, нагруженного силами, зависящими только от положения, при неустановившемся режиме определяется методами Виттенбауэра, И.И.Артоболевского и др. Для динамического анализа механизмов, нагруженных силами и моментами, зависящими как от положения, так и от скорости, используется методами М.А.Скуридина, Н.А.Мерцалова и др.

В настоящее время на базе Инженерной академии КР и института Машиноведения НАН КР разрабатываются и создаются виброударные машины на основе механизмов переменной структуры, такие, как отбойные молотки, молоты, перфораторы, уплотнительные машины ударного действия и др. Одной из таких машин, обладающей наибольшей энергией удара, является механический генератор ударных импульсов высокой мощности ГУИМ-1, предназначенный для уплотнения грунта при построении плотин, дамб и других сооружений. В настоящей статье нами предлагается новая методика динамического анализа, которая позволяет определить закон движения звеньев механизма на всех режимах работы машинного агрегата. Рассмотрим особенности данной методики на примере ГУИМ-1.

С учетом невысокой, в пределах  $0,35 \text{ Гц}$  частотой ударов, совершаемых механическим генератором ударных импульсов высокой мощности ГУИМ-1, предполагаем, что колебания, возникающие за счет упругости звеньев при движении механизма, не велики. Поэтому динамический анализ данной машины будем проводить в несколько упрощенном варианте, т.е. пренебрегая упругими свойствами деталей и узлов машины.

Для проведения динамического анализа используем уравнение движения в дифференциальной форме [2]:

$$J_{\Sigma}^{np} \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dJ_{\Sigma}^{np}}{d\varphi} \omega^2 = M_{\Sigma}^{np}. \quad (1)$$

В уравнении (1) суммарный приведенный момент инерции  $J_{\Sigma}^{np}$  состоит из двух составляющих: приведенного момента инерции, зависящего от положения механизма (приведенный момент инерции кривошипно-коромыслового исполнительного ударного механизма)  $J_{МПС}^{np}$  и приведенного момента, имеющего постоянное значение (приведенный момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся деталей и узлов редуктора)  $J_{const}^{np}$

$$J_{\Sigma}^{np} = J_{МПС}^{np} + J_{const}^{np}. \quad (2)$$

Следует заметить, что согласно общепринятым правилам положительным направлением отчета угла  $\varphi_1$ , т.е. обобщенной угловой координаты кривошипно-коромыслового механизма было принято направление против часовой стрелки. Ввиду

того, что в исследуемой машине кривошип вращается по часовой стрелке, при анализе графиков зависимостей различных параметров от положения звена привода, т.е. кривошипа, целесообразно использовать не угол  $\varphi_1$ , а  $\varphi_1^*$ , отсчет которого производится по часовой стрелке, т.е. по направлению вращения кривошипа.

Графики зависимостей суммарного приведенного момента инерции  $J_{\Sigma}^{np}$  и приведенного момента инерции кривошипно-коромыслового механизма переменной структуры  $J_{МПС}^{np}$  от угловой координаты звена привода  $\varphi_1^*$  приведены на рис. 1.

Суммарный приведенный момент  $M_{\Sigma}^{np}$  в уравнении (1) состоит из приведенного момента сил тяжести звеньев МПС  $M_{G_{\Sigma}}^{np}$ , зависящего от положения механизма и приведенного момента двигателя  $M_{дв}^{np}$ , зависящего от скорости вращения кривошипа, т.е.

$$M_{\Sigma}^{np} = M_{G_{\Sigma}}^{np} + M_{дв}^{np}.$$

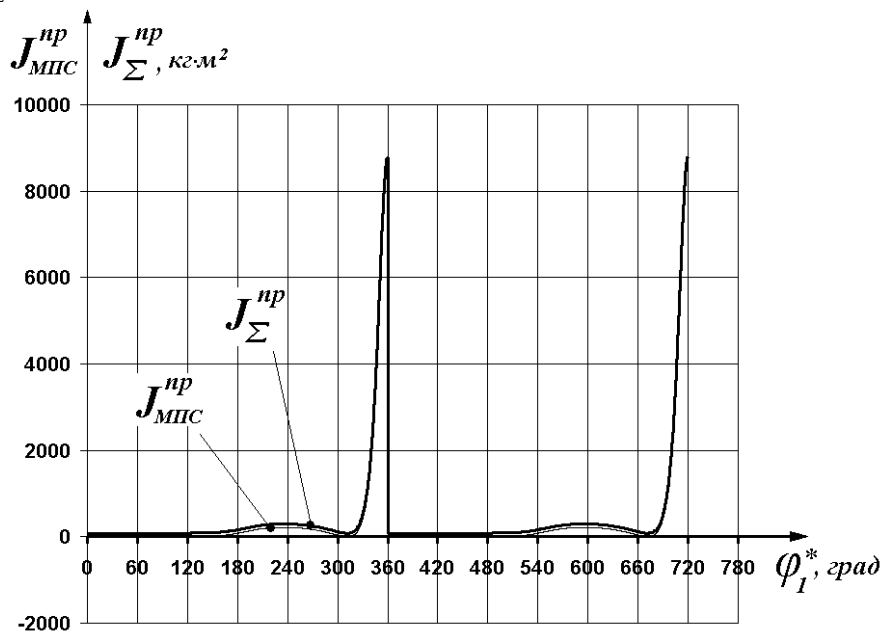


Рис. 1. Зависимости приведенного момента инерции МПС и суммарного приведенного момента инерции от угловой координаты звена привода.

Приведенный момент сил тяжести звеньев МПС  $M_{G_{\Sigma}}^{np}$  определяется как сумма приведенных моментов сил тяжести кривошипа, шатуна и коромысла.

График зависимости суммарного приведенного момента сил тяжести звеньев кривошипно-коромыслового МПС  $M_{G_{\Sigma}}^{np}$  от угла  $\varphi_1^*$ , полученной при горизонтальном расположении ГУИМ-1 ( $\psi = 0^0$ ), представлен на рис. 2.

Вторая составляющая суммарного приведенного момента  $M_{дв}^{np}$ , т.е. момент на валу ротора асинхронного электродвигателя 4А112 М4 РЗ УЗ, приведенный к кривошипу и зависящий от угловой скорости кривошипа, определяется на основе формулы Клосса [2]:

$$M_{дв}^{np} = \frac{2M_{\kappa}^{np} \cdot S \cdot S_{\kappa}}{S_{\kappa}^2 + S^2}, \quad (3)$$

где  $M_{\kappa}^{np} = 531482 \text{ н} \cdot \text{м}$  – критический момент на валу ротора, приведенный к кривошипу;

$S_{\kappa} = 0,25$  – критическое скольжение;  $S = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_0^{np}}$  – скольжение;  $\omega_1$  – угловая

скорость кривошипа;  $\omega_0^{np} = \frac{\omega_0}{u_{mp}} = 2,3668 \text{ с}^{-1}$  – угловая скорость кривошипа,

соответствующая синхронной угловой скорости вращения ротора  $\omega_0$ ;  $u_{\delta\delta} = 66,37$  – передаточное отношение трансмиссии.

Угловое перемещение кривошипа (звена приведения) делим на элементарные угловые шаги величиной  $\Delta\varphi^* = \varphi_1^* - \varphi_0^* = \dots = \varphi_n^* - \varphi_{n-1}^*$  (рис. 3). Приближенно можно принять, что в пределах небольшого интервала  $\Delta\varphi^*$  при увеличении угла  $\varphi_1^*$  движение звена приведения равноускоренное, суммарный приведенный момент инерции изменяется линейно и суммарный приведенный момент остается неизменным [3]. С учетом отмеченных выше допущений, формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$J_{\Sigma}^{np} \cdot \varepsilon + \frac{1}{2} \frac{\Delta J_{\Sigma}^{np}}{\Delta \varphi^*} \omega^2 = M_{G_{\Sigma}}^{np}(\varphi^*) + M_{\delta\delta}^{np}(\omega), \quad (4)$$

где  $J_{\Sigma}^{np}$  – среднее значение суммарного приведенного момента в угловом интервале  $\Delta\varphi^*$ ;  $\varepsilon$  – угловое ускорение звена приведения в отрезке времени, при котором кривошип поворачивается на угловой шаг (интервал)  $\Delta\varphi^*$ ;  $\Delta J_{\Sigma}^{np}$  – разность значений суммарного приведенного момента  $J_{\Sigma}^{np}$  в конце и начале углового шага  $\Delta\varphi^*$ ;  $\omega$  – угловая скорость звена приведения в начале углового шага  $\Delta\varphi^*$ ;  $M_{G_{\Sigma}}^{np}(\varphi^*)$  – среднее значение суммарного приведенного момента сил тяжести подвижных звеньев МПС в угловом интервала  $\Delta\varphi^*$ ;  $M_{\delta\delta}^{np}(\omega)$  – приведенный момент двигателя в начале углового интервала  $\Delta\varphi^*$ .

Формулу (4) применительно к перемещению звена приведения из положения «0» ( $\varphi_0^*$ ) в положение «1» ( $\varphi_1^*$ ) запишем в следующем виде:

$$J_{\Sigma}^{i\delta} \left( \varphi_0^* \div \varphi_1^* \right) \cdot \varepsilon_{01} + \frac{1}{2} \cdot \frac{J_{\Sigma}^{i\delta}(\varphi_1^*) - J_{\Sigma}^{i\delta}(\varphi_0^*)}{\Delta\varphi^*} \cdot \omega_0^2 = M_{G_{\Sigma}}^{i\delta} \left( \varphi_0^* \div \varphi_1^* \right) + M_{\delta\delta}^{i\delta}(\omega_0). \quad (5)$$

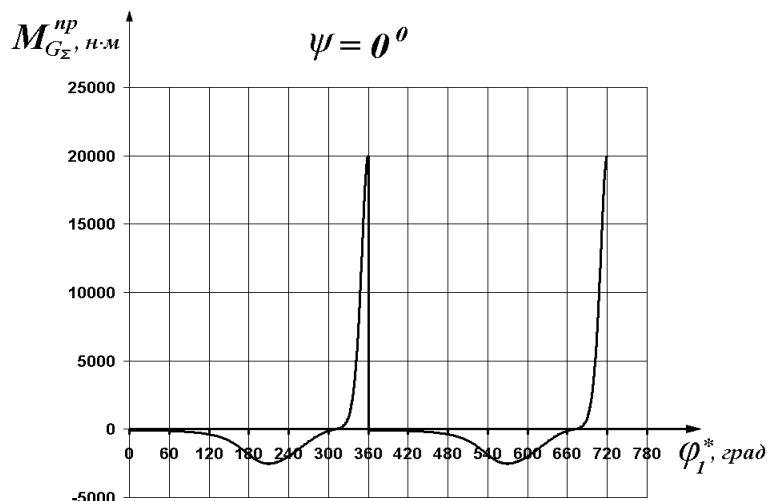


Рис. 2. Зависимость суммарного приведенного момента сил тяжести звеньев кривошипно-коромыслового МПС  $M_{G_{\Sigma}}^{np}$  от угла  $\varphi_1^*$  при  $\psi = 0^{\circ}$ .

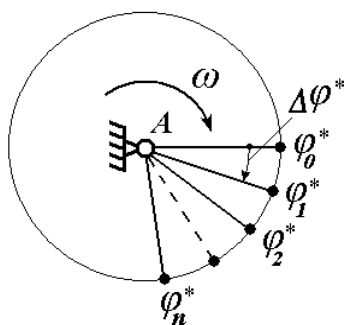


Рис. 3

Для выполнения расчета, должны быть заданы начальные условия, т.е.  $\varphi_0^*$  и  $\omega_0$ . Из этих начальных условий определяем  $\varphi_1^* = \varphi_0^* + \Delta\varphi^*$ , затем, используя формулу (2) определяем  $J_{\Sigma}^{np}(\varphi_0^*)$  и  $J_{\Sigma}^{np}(\varphi_1^*)$ . Среднее значение приведенного момента инерции в интервале  $0-1$  определяется по формуле

$$J_{\Sigma}^{i\partial}(\varphi_0^* \div \varphi_1^*) = \frac{J_{\Sigma}^{i\partial}(\varphi_1^*) + J_{\Sigma}^{i\partial}(\varphi_0^*)}{2}$$

Среднее значение суммарного приведенного момента сил тяжести  $\dot{I}_{G_{\Sigma}}^{i\partial}(\varphi_0^* + \varphi_1^*)$  в угловом интервале  $0-1$  определяется

$$M_{G_{\Sigma}}^{i\partial}(\varphi_0^* \div \varphi_1^*) = \frac{M_{G_{\Sigma}}^{i\partial}(\varphi_0^*) + M_{G_{\Sigma}}^{i\partial}(\varphi_1^*)}{2}$$

Момент на валу двигателя  $M_{\partial e}^{np}(\omega_0)$ , приведенный к кривошипу, определяется по формуле (3). Таким образом, из уравнения (5) можно определить ускорение  $\varepsilon_{01}$  звена приведения в интервале углового перемещения от  $\varphi_0^*$  до  $\varphi_1^*$ :

$$\varepsilon_{01} = \frac{M_{G_{\Sigma}}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_0^* \div \varphi_1^*) + M_{aa}^{i\ddot{\theta}}(\omega_0)}{J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_0^* \div \varphi_1^*)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_1^*) - J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_0^*)}{\Delta\varphi^* \cdot J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_0^* \div \varphi_1^*)} \cdot \omega_0^2. \quad (6)$$

Выше было отмечено, что внутри углового шага  $\Delta\varphi^*$ , из-за его малости, движение звена приведения считалось равноускоренным. Тогда промежуток времени  $\Delta t_{01}$ , в течение которого кривошип (звено приведения) поворачивается на угол  $\Delta\varphi^*$  (от угла  $\varphi_0^*$  до  $\varphi_1^*$ ), определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_{01} = \frac{-\omega_0 + \sqrt{\omega_0^2 + 2\varepsilon_{01} \cdot \Delta\varphi^*}}{\varepsilon_{01}}. \quad (7)$$

Далее, по общеизвестной формуле  $\omega_1 = \omega_0 + \varepsilon_{01} \cdot \Delta t_{01}$  определим угловую скорость кривошипа в конце углового шага  $\Delta\varphi^*$ , т.е. в положении, соответствующем углу  $\varphi_1^*$ .

Поскольку стали известными  $\varphi_1^*$  и  $\omega_1$ , все проведенные выше расчеты кинематических параметров можно использовать и для следующего углового шага кривошипа, т.е. в угловом перемещении звена приведения от  $\varphi_1^*$  до  $\varphi_2^*$ :

1) ускорение перемещения:

$$\varepsilon_{12} = \frac{M_{G_{\Sigma}}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_1^* \div \varphi_2^*) + M_{aa}^{i\ddot{\theta}}(\omega_1)}{J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_1^* \div \varphi_2^*)} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_2^*) - J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_1^*)}{\Delta\varphi^* \cdot J_{\Sigma}^{i\ddot{\theta}}(\varphi_1^* \div \varphi_2^*)} \cdot \omega_1^2, \text{ где } \varphi_2^* = \varphi_1^* + \Delta\varphi^* ;$$

2) продолжительность перемещения:

$$\Delta t_{12} = \frac{-\omega_1 + \sqrt{\omega_1^2 + 2\varepsilon_{12} \cdot \Delta\varphi^*}}{\varepsilon_{12}} ;$$

3) угловая скорость в конце перемещения:

$$\omega_2 = \omega_1 + \varepsilon_{12} \cdot \Delta t_{12}.$$

Расчет кинематических параметров для последующих шагов производится аналогично. Полное время работы машины рассчитывается на ЭВМ следующим образом:

$$t = \Delta t_{01} + \Delta t_{12} + \dots + \Delta t_{n-1; n}.$$

Литература:

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988.
2. Вейц В.Л. Основы динамики и прочности машин. – Л.: Изд. ЛГУ, 1978.
3. Абдраимов С., Зиялиев К.Ж., Чинбаев О.К., Такырбашев А.Б., Каримов А.А. Динамическая модель шарнирно-четырёхзвенного механизма / Материалы междунар. научно–практ. конф. «Повышение эффективных показателей транспортных, строительно-дорожных машин и коммуникаций в условиях высокогорья и жаркого климата». – Бишкек, 2003. – С. 355-359.