

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОСТА МАШИНЫ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ

НПП ВНИИЭМ разработал комплекс электрооборудования (КЭ) нового поколения для системы управления машиной перегрузочной (МП). КЭ может быть применен как при модернизации систем управления МП на действующих энергоблоках, так и при создании новых энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Основой регулируемых приводов в комплексе электрооборудования является частотно-регулируемый асинхронный электропривод, а нерегулируемых - коммутируемый асинхронный электропривод. В приводах используются специальные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором и встроенным электромагнитным тормозом [1].

Мост, являющийся одним из основных механизмов МП, отвечает за наведение на ячейку по координате X . Этот механизм наиболее массивный по сравнению с остальными и второй в КЭ, после привода захвата тепловыделяющих сборок, по развиваемой мощности (4 кВт).

Для обеспечения ядерной безопасности при транспортно-технологических операциях, к приводу моста предъявляется требование по обеспечению равномерности движения, выражаемое в ограничении максимально допустимого ускорения до $0,1 \text{ м/с}^2$, возникающего при изменении скорости движения. В связи с этим, механизм перемещения моста снабжен регулируемым электроприводом.

Существует ряд реализаций кинематических схем, применяемых в механизмах перемещения моста МП (рис. 1)

В механизме (рис. 1,а) передача крутящего момента от электродвигателя производится через редуктор непосредственно на ведущее колесо моста, а в механизме (рис. 1,б) передача крутящего момента от электродвигателя осуществляется через редуктор, выходной вал которого имеет длину несколько метров и является осью ведущих колес моста.

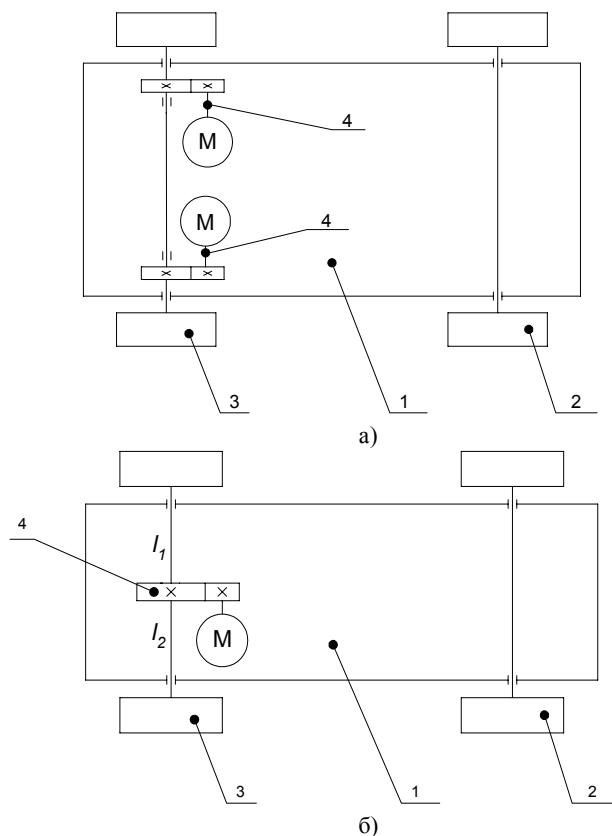


Рис. 1. Возможные кинематические схемы выполнения механизма перемещения моста МП: 1- мост, 2- ведомая ось моста, 3 – ведущая ось моста, 4 – редукторный привод, l_1, l_2 - длины осей ведущих колес

Для приводов перемещения моста 1-го и 3-го блоков Калининской АЭС (КаАЭС) было измерено ускорение при движении моста МП на малой скорости 0,4 м/мин. (рис. 2, 3 и 4, 5 соответственно).

На первом энергоблоке КаАЭС установлены привода постоянного тока (см. рис. 1,а), а на третьем энергоблоке после модернизации МП – регулируемый частотно-управляемый асинхронный привод (см. рис. 1,б).

Известно, что электродвигатели постоянного тока вне зависимости от частоты вращения ротора создают крутящий момент, не имеющий пульсаций с низкой частотой. В случае же применения

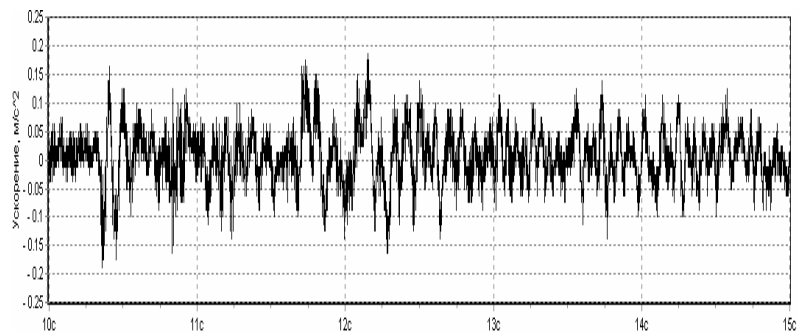


Рис. 2. Линейное ускорение МП при стационарном режиме работы привода моста на 1-м блоке КаАЭС

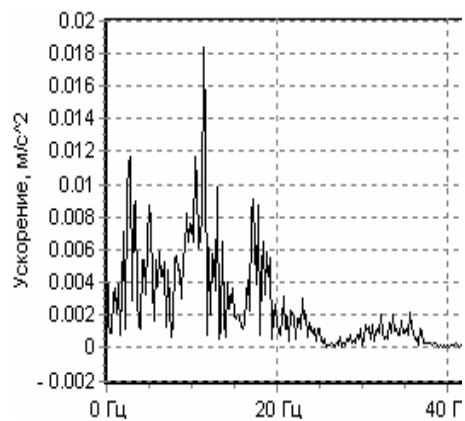


Рис. 3. Спектральный состав линейного ускорения МП в полосе частот 0-40 Гц

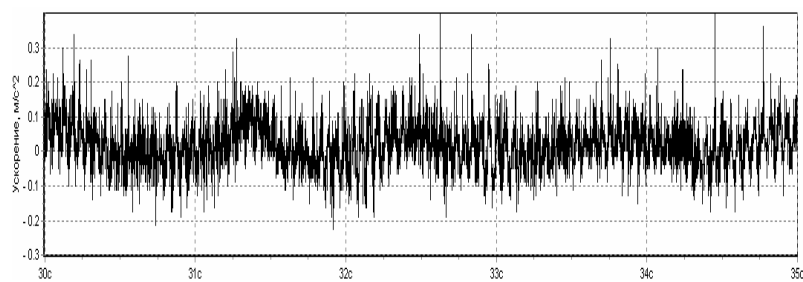


Рис. 4. Линейное ускорение МП при стационарном режиме работы привода моста на 3-м блоке КаАЭС

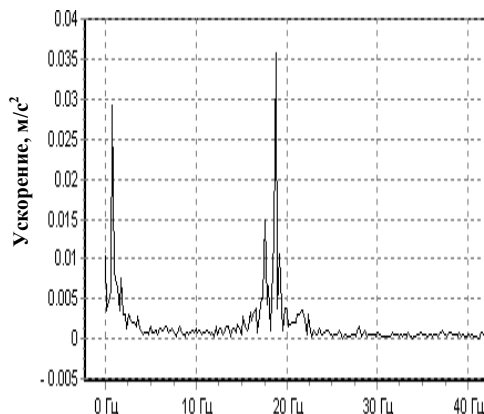


Рис. 5. Спектральный состав линейного ускорения МП в полосе частот 0-40 Гц

частотно-управляемого асинхронного привода, спектр тока, подаваемого на электродвигатель, содержит, кроме основной (частота питания), гармоники кратные частоте питания, создаваемой преобразователем для каждой из скоростей движения. Это связано, в том числе, с формой напряжения питания электродвигателя, обеспечиваемого преобразователем на основе ШИМ и погрешностями укладки обмотки статора. Вследствие несинусоидальности питания, крутящий момент, создаваемый электродвигателем, может иметь пульсации.

Так же природа пульсаций может быть механической - переменное сопротивление со стороны рельсового пути либо в редукторе привода, а также наличие в механизме передачи движения от двигателя к колесу моста явно выраженного упругого звена.

Основные гармоники переменной составляющей ускорения моста МП 1-го энергоблока имеются на частотах около 2 Гц ($0,01 \text{ м/с}^2$) и 10 Гц ($0,02 \text{ м/с}^2$) (рис. 3).

Основные гармоники переменной составляющей ускорения моста МП 3-го энергоблока имеются на частотах около 0,8 Гц ($0,03 \text{ м/с}^2$) и 18,8 Гц ($0,036 \text{ м/с}^2$) (рис. 5).

Из рис. 3 и 5 видно, что несмотря на различный характер спектра, ускорение в несколько раз меньше допустимой при ускоренном движении моста величины.

Примененный в механизме перемещения моста 3-го блока асинхронный двигатель АДА112МВ6 - шестиполусный. [2]. Важно отметить, что для заданных параметров кинематической схемы (передаточное отношение редуктора привода 106) скорость движения

моста 0,4 м/мин может быть обеспечена при частоте питания двигателя около 2,8 Гц.

Если предположить, что эти пульсации создаются электродвигателем, то амплитуда колебаний ускорения на роторе двигателя с учетом передаточного отношения редуктора привода должна составлять 12,6 рад/с². Столь значительная величина ускорения противоречит имеющимся результатам экспериментального исследования двигателя [3].

Следовательно, причину возникновения пульсаций момента стоит искать в механической части привода.

Для того, чтобы обеспечить равномерное или равноускоренное движение механизмов МП с различными кинематическими схемами, необходимо с учетом их конструктивных особенностей сформулировать требования к приводам и системам их управления по создаваемым ими пульсациям крутящего момента.

Для этих целей необходимо построить математическую модель привода механизма и с её помощью исследовать влияние пульсаций крутящего момента на равномерность хода механизма перемещения моста.

В связи с тем, что для механизма перемещения моста 3-го блока КаАЭС создание такой модели представляет больший интерес (КЭ МП модернизирован, при движении наблюдаются большие, чем на другой исследованной конструкции, пульсации ускорения, передача движения от двигателя к колесам моста производится через длинный вал), рассмотрим математическую модель для этого механизма.

Механизм привода моста имеет следующие параметры:

Масса МП, m , кг	80000
Радиус опорного колеса моста, R , м	0,25
Общая длина вала, соединяющего редуктор с колесами моста, L , м	5,476
Место расположения редуктора по отношению к ведущим колесам моста, l_1/l_2 , м	2,738
Диаметр вала-оси колес, D , м	0,09
Момент инерции ротора двигателя АДА112МВ6, $J_{дв}$, кг·м ²	0,021
Суммарное передаточное отношение редукторов привода моста, i	106,1

Кинематическая схема привода, включающая редуктор с n -зубчатыми передачами, приведена на рис. 6. Электродвигатель характеризуется моментом инерции ротора $J_{дв}$ и создаваемым крутящим моментом $M_{дв}(t)$. МП заменена одним опорным колесом радиуса R , к которому отнесена вся ее масса m . Колесо соединено с редуктором стальным валом, характеризующимся суммарной жесткостью C_n .

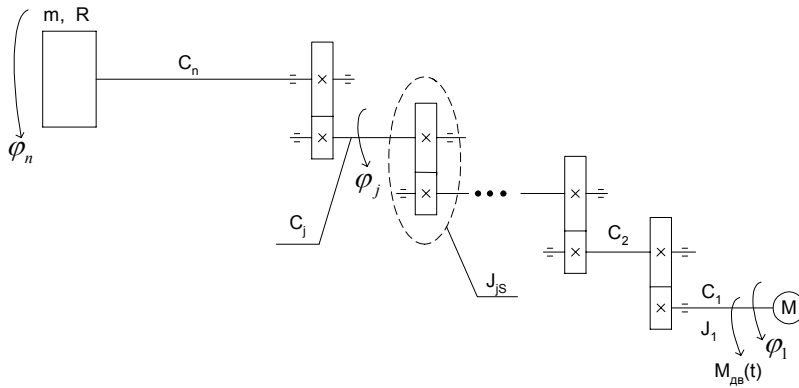


Рис. 6. Кинематическая схема механизма привода моста

Запишем уравнения Лагранжа [4] для этой механической системы. В качестве независимых координат выбраны углы поворота φ_j каждого зубчатого колеса. Отсчет ведется от двигателя, при этом φ_1 - угол поворота ротора двигателя.

Углы поворота шестерен, расположенных на j -1 валу, выражены через обобщенные координаты φ_j следующим образом:

$\varphi_{j-1} = i_j \varphi_j$, где i_j - передаточное отношение в j -й механической передаче, передающей движение с j -1 вала на j вал.

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi}_1 + C_1 (\varphi_2 - \varphi_1) = M(t) \\ J_{2S} \ddot{\varphi}_2 + C_2 (i_3 \varphi_3 - \varphi_2) - C_1 (i_2 \varphi_2 - \varphi_1) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ J_{jS} \ddot{\varphi}_j + C_j (i_{j+1} \varphi_{j+1} - \varphi_j) - C_{j-1} (i_j \varphi_j - \varphi_{j-1}) = 0 \end{cases}, j=2..n, \quad (1)$$

где φ_n - угол поворота вала, соединяющего редуктор с ведомым колесом моста; $J_{jS} = J_j + J_{j-1}$ - момент инерции зубчатой передачи; C_j - жесткость j -й механической передачи (может включать жесткость валов, зубьев колес, муфт); $J_{nS} = mR^2$ - момент инерции машины перегрузочной; C_n - жесткость вала, соединяющего редуктор с ведомым колесом моста.

Использованные в выражении (1) величины моментов инерции J_j , углов поворота φ_j , жесткостей валов C_j и крутящего момента двигателя $M(t)$ приведены к выходному валу редуктора.

Достоверно определить величины C_j , входящие в (1), затруднительно, так как это сопряжено с необходимостью учитывать податливость зубьев, наличие боковых зазоров.

Отметим, что крутильная жесткость валов внутри редуктора значительно превышает жесткость вала, соединяющего редуктор с колесом моста. Так же отметим, что моменты инерции зубчатых колес и валов редуктора, приведенные к выходному валу редуктора, значительно меньше момента инерции ротора двигателя и самого моста, приведенного к той же точке.

Учитывая выше написанное, рассмотрим упрощенную систему, состоящую из двух жестких тел (ротор двигателя и мост), соединенных через редуктор с передаточным отношением i упругим элементом с жесткостью C (рис. 7).

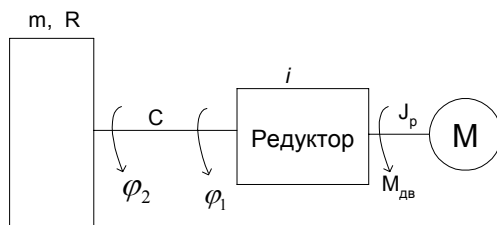


Рис. 7. Упрощенная кинематическая схема привода

Для удобства рассмотрения выберем в качестве обобщенных координат:

$$q_1 = \varphi_1; q_2 = \varphi_2 - \varphi_1,$$

где $\varphi_1 = \frac{\varphi_{\text{дв}}}{i}$ - приведенный к выходному валу редуктора угол поворота ротора двигателя $\varphi_{\text{дв}}$; i - передаточное отношение редуктора привода; φ_2 - угол поворота ведущего колеса моста.

Уравнение Лагранжа для рассматриваемой системы имеет вид:

$$\begin{cases} (J_1 + J_2)\ddot{q}_1 + J_2\ddot{q}_2 = M(t) \\ J_2\ddot{q}_1 + J_2\ddot{q}_2 + Cq_2 = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где $M(t) = M_{\text{дв}}i$ - крутящий момент, создаваемый двигателем, приведенный к выходному валу редуктора; $J_1 = J_{\text{дв}}i^2$ - приведенный к выходному валу редуктора момент инерции ротора двигателя.

ля; $J_2 = mR^2$ - эквивалентный момент инерции МП; R - радиус опорного колеса моста; C - суммарная жесткость вала-оси колес моста, вычисляемая по формуле:

$$C = GJ_p \frac{l_1 + l_2}{l_1 l_2},$$

где G - модуль упругости материала вала при сдвиге; J_p - полярный момент инерции сечения вала относительно оси вала; l_1, l_2 - длина вала-оси колеса, подвергаемых скручиванию (рис. 1,б).

Линейное ускорение \ddot{x}_2 может быть выражено через вторые производные обобщенных координат:

$$\ddot{x}_2 = \dot{\varphi}_2 R = \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2$$

Вторая производная обобщенной координаты q_1 может быть выражена из системы (2).

После подстановки имеем:

$$\ddot{x}_2 = \frac{R}{J_1 + J_2} (M(t) + J_1 \ddot{q}_2), \quad (3)$$

Получим решение для обобщенной координаты q_2 . Выразив из первого уравнения системы (2) \ddot{q}_1 и исключив его из второго уравнения этой системы, получим уравнение вынужденных колебаний относительно координаты \ddot{q}_2 :

$$\ddot{q}_2 + \omega_c^2 q_2 = -\frac{1}{J_1} M(t), \quad (4)$$

где

$$\omega_c = \sqrt{C \frac{(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} - \text{собственная частота системы.} \quad (5)$$

Подставив в (5) численные значения параметров кинематической схемы привода моста МП 3-го энергоблока КаАЭС, можно видеть, что собственная частота системы «ротор – редуктор – вал – мост» равна 6,5 Гц.

С учетом демпфирования в системе выражение (4) может быть представлено в виде:

$$\ddot{q}_2 + 2\varepsilon\omega_c\dot{q}_2 + \omega_c^2 q_2 = -\frac{1}{J_1}M(t), \quad (6)$$

где ε – коэффициент трения [4].

Выражение для крутящего момента, действующего со стороны двигателя может быть представлено в виде:

$$M(t) = M_0 + \sum_{k=1}^n M_k \cos(k\omega_0 t), \quad (7)$$

где ω_0 – частота питания, подаваемая от преобразователя на двигатель; M_0 – постоянная составляющая крутящего момента, создаваемого двигателем, k – номер гармоники спектра крутящего момента; M_k – амплитуда k -й гармоники крутящего момента.

Решение уравнения (6) представляется в виде:

$$q_2(t) = q_{20} + \sum_{k=1}^n q_{2k} \cos(k\omega_0 t + \gamma_k), \quad (8)$$

где

$$\gamma_k = \arctg \frac{\frac{\mathcal{G}}{\pi} \eta}{1 - \eta^2} - \text{фазовый угол } k\text{-ой гармоники.}$$

Подставив решение (8) и функцию крутящего момента (7) в уравнение (6), получаем соответствующие амплитуды установившихся вынужденных колебаний под действием составляющей крутящего момента с частотой $k\omega_0$:

$$q_{2k} = q_{2cm} K_\delta, \quad (9)$$

где $q_{2cm} = -\frac{M_k}{J_1 \omega_c^2}$ – статическое смещение; K_δ – коэффициент динамического усиления колебаний;

$$K_\delta = \left[(1 - \eta^2)^2 + \left(\frac{\mathcal{G}}{\pi} \right)^2 \eta^2 \right]^{-1}, \quad (10)$$

где $\eta = \frac{k\omega_0}{\omega}$ – частотное отношение; $\mathcal{G} = 2\pi\varepsilon$ – декремент колебаний.

Подставив в формулу (3) выражения (7) - (9), получаем зависимость для амплитуды гармоники линейного ускорения моста МП под действием гармоники крутящего момента, действующей с частотой $k\omega_0$:

$$a_{2k} = \frac{M_k R}{J_1 + J_2} (1 + K_d \eta^2). \quad (11)$$

Предполагая, что в системе наблюдается явление резонанса (совпадение k -й гармоники пульсации крутящего момента, создаваемого двигателем, и частоты крутильных колебаний системы ведущее колесо – вал – редуктор - двигатель) формула (11) после подстановки выражения для коэффициента динамичности (10) приобретает вид:

$$a_{2k} = \frac{M_k R}{J_1 + J_2} \left(1 + \frac{1}{2\varepsilon} \right). \quad (12)$$

При малом демпфировании, как видно из формулы (12), ускорение, воспринимаемое системой, резко возрастает.

Для случая резонансных явлений оценим величину пульсаций момента двигателя, необходимых для возбуждения колебательного движения моста с известной амплитудой ускорения a_{2k} :

$$M_k^{os} = \frac{a_{2k} (J_1 + J_2) 2\varepsilon}{Ri(2\varepsilon + 1)}. \quad (13)$$

Принимая в качестве амплитуды ускорения максимально допустимое для моста значение этого параметра – $0,1 \text{ м/с}^2$, формулу (13) можно использовать для оценки допустимых величин пульсаций момента двигателя.

Для крутильных колебаний протяженных валов характерны малые величины демпфирования ($\varepsilon = 0,01$).

Система, кинематическая схема которой представлена на рис. 1,а, не имеет явно выраженного колебательного звена, в связи с этим, можно предполагать, имеет собственную частоту значительно превосходящую частоту возмущающей силы. Для такой схемы (для случая замены двигателя постоянного тока на двигатель другого типа) формула (11) принимает вид:

$$a_{2k} = \frac{M_k R}{J_1 + J_2}$$

Формула для оценки пульсаций момента двигателя в этом случае имеет вид:

$$M_k^{\partial s} = \frac{a_{2k}(J_1 + J_2)}{Ri} \quad (14)$$

Взяв отношение выражений (13) к (14) можно видеть, что при указанных выше значениях демпфирования, в момент резонанса, амплитуда k -й гармоники ускорения будет до 50 раз превосходить амплитуду момента в «жесткой системе». В этом случае, для получения в «гибкой системе» (см. рис. 1,б) амплитуд пульсации ускорения одного порядка с амплитудами, возникающими в «жесткой системе» (см. рис. 1,а), необходимо, чтобы двигатель создавал на частоте, равной собственной частоте системы, амплитуду крутящего момента равную менее двух процентов от момента, подаваемого в «жесткую» систему на этой же частоте.

Отметим, что с точки зрения минимизации колебательной составляющей движения моста (или другого механизма) наличие упругой слабо демпфированной связи (типа длинного вала) нежелательно.

В случае же наличия такой связи, целесообразно ввести ограничение на формирование скорости (частоты питания) в полосах частот, соответствующих собственной частоте механической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Портной Ю.Т. Система управления перегрузочными машинами АЭС с реакторами ВВЭР-1000. М.: Труды НПП ВНИИЭМ. 2001. Т.100. С. 225-234.
2. Кроть И.А., Блинные Д.Н., Аронзон А.Н., Казачков А.Н. Программно-аппаратное обеспечение измерения характеристик автоматизированных электроприводов машин// См. наст. том.
3. ТАИК525222.002ТУ Двигатели асинхронные типа АДА. Технические условия.
4. Вибрация в технике. Справочник в 6-ти томах. Под. ред. Болотина В.В. М.: Машиностроение. 1978. Т. 1. С. 62-69, 101-105.