

УДК 621.86

Т.В. Селенская, Е.И. Селенский, А.Д. Ионкина

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ВРАЩЕНИЕ КОНСОЛЬНОГО КРАНА

Исследовано влияние статической и динамической характеристик приводного асинхронного электродвигателя на вращение консольного поворотного крана при его разгоне и установившемся движении.

Ключевые слова: консольный поворотный кран на колонне, асинхронный электродвигатель, статическая характеристика, динамическая характеристика, электромагнитная постоянная времени, время разгона, перерегулирование, установившийся режим.

Повышение эффективности производства и качества выпускаемой продукции на базе внедрения новой техники является одним из определяющих направлений в машиностроении. Значительная роль в решении связанных с этим задач принадлежит подъемно-транспортным машинам, эффективное использование которых возможно при условии обеспечения требуемого уровня надежности, безопасности эксплуатации, а также сохранности перемещаемого груза, зависящих от динамических процессов, протекающих в элементах конструкции машин и обусловленных, в частности, характеристиками приводных электродвигателей [1].

Весьма распространенным видом подъемно-транспортных машин являются подъемные краны общего и специального назначения. Рабочее время подъемного крана состоит из трех повторяющихся периодов: времени пуска (разгона), времени установившегося движения и времени остановки (торможения). Работа крана в течение каждого из указанных периодов сопровождается сложными динамическими процессами, которые в той или иной мере оказывают воздействие как на характер движения перемещаемого груза, так и на движение, прочность и устойчивость самой крановой конструкции. Возможность повышения грузоподъемности и скоростей рабочих движений крана связана с необходимостью анализа указанных процессов, возникающих при эксплуатации крана [2].

Одной из важнейших и актуальных задач динамики крановых конструкций является оценка влияния механических параметров приводного электродвигателя на характер движения крана.

В данной работе приведены результаты решения такой задачи применительно к конструкции поворотного консольного крана грузоподъемностью $m_T = 4$ т, вдоль стрелы которого с постоянной скоростью $v = 0,18$ м/с перемещается тележка (таль) с грузом (рис.1).

Основные технические параметры крана: $h = 3$ м – высота подъема груза; $\lambda = 4$ м – вылет стрелы; $x_{\min} = 0,85$ м – минимальное расстояние от тележки до оси вращения крана; $J_k = 1,37 \cdot 10^5$ кг·м² – момент инерции крана относительно оси вращения z , учитывающий инерционность поворотной части крана (с грузом и противовесом) и инерционность механизма поворота; $\omega_H = 0,2$ рад/с – номинальная угловая скорость вращения крана [3].

Кран приводится в движение асинхронным электродвигателем типа 4АС90LE6 через механическую передачу, общее передаточное число которой $i = 487$ [3]. Номинальная

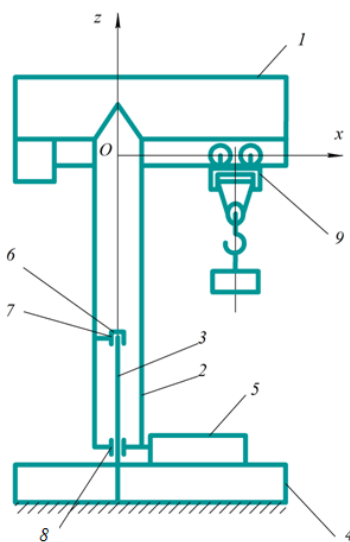


Рис. 1. Кинематическая схема консольного крана на колонне: 1 – стрела; 2 – гильза; 3 – колонна; 4 – опорная рама; 5 – механизм поворота; 6, 7, 8 – подшипники; 9 – тележка

мощность электродвигателя $P=1,7$ кВт, синхронная частота вращения $n_{\partial c} = 1000$ об/мин, номинальная частота вращения $n_{\partial н} = 930$ об/мин, номинальный момент $M_n = 17,5$ Н·м.

В работе [3] электродвигатель рекомендовано подбирать по мощности $N = \frac{(M_{тр} + M_{дин}) \omega_n}{\eta} = 1,7$ кВт, которая рассчитывается с учетом КПД $\eta = 0,665$ механической передачи и момента сопротивления повороту крана в пусковом режиме, являющегося суммой момента трения $M_{тр} = 0,334$ Н·м в подшипниках и динамического момента $M_{дин}$, соответствующего нормированному минимальному значению линейного ускорения $[a] = 0,15$ м/с² груза при его положении в конце стрелы. При этом $\varepsilon = \frac{[a]}{\lambda} = \frac{0,15}{4} = 0,0375$ рад/с², $M_{дин} = J_{\kappa} \varepsilon = 1,37 \cdot 10^5 \cdot 0,0375 = 5155$ Н·м. Оценка времени пуска t_p двигателя выполнена при условии, что вращение крана в период разгона является равноускоренным: $t_p = \frac{\omega_n}{\varepsilon} = \frac{0,2}{0,0375} = 5,3$ с.

Важной является не только задача обеспечения времени разгона t_p крана большим величины нормированного минимального времени разгона $[t_p] = 1$ с во избежание чрезмерного раскачивания груза и перегрева электродвигателя, но и задача уменьшения неравномерности вращения крана при установившемся режиме и перерегулирования переходного процесса, что позволяет снизить потери мощности двигателя и повысить работоспособность механической передачи.

Ниже исследуется влияние статической и динамической характеристик приводного асинхронного двигателя на вращение консольного поворотного крана при его разгоне и установившемся движении.

Полагая статическую характеристику двигателя линейной, представим ее в виде

$$M_{ст}(\omega_{\partial}) \equiv M_{\partial}(\omega_{\partial}) = M_{\partial}(\omega_{\partial н}) - s(\omega_{\partial} - \omega_{\partial н}), \quad (1)$$

где ω_{∂} – текущая угловая скорость ротора двигателя; $\omega_{\partial н} = \frac{\pi n_{\partial н}}{30} = 97,4$ рад/с – номинальная угловая скорость ротора двигателя; $M_{\partial}(\omega_{\partial н}) = M_n = 17,5$ Н·м – номинальный момент двигателя; $s = M_{\partial}(\omega_{\partial н}) / (\omega_{хх} - \omega_{\partial н}) = 17,5 / (104,7 - 97,4) = 2,4$ Н·м·с – крутизна статической характеристики; $\omega_{хх} \approx \omega_{\partial c} = \frac{\pi n_{\partial c}}{30} = 104,7$ рад/с – угловая скорость холостого хода.

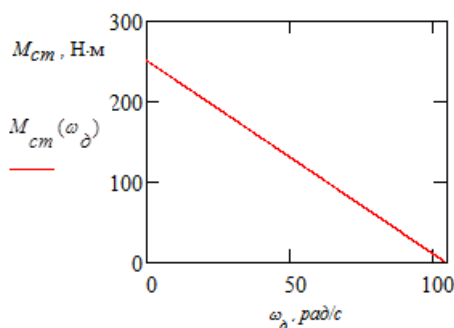


Рис.2. Линейная статическая характеристика электродвигателя 4AC90LE6

На рис. 2 показана линейная статическая характеристика (1) электродвигателя 4AC90LE6. С учетом передаточного числа $i=487$ механической передачи приведем движущий момент электродвигателя к оси вращения крана. При этом расчетная линейная статическая характеристика двигателя выражается уравнением

$$M_{ст}(\omega) = M_{\partial 0} - \alpha \omega,$$

где $M_{\partial 0} = 122,234 \cdot 10^3$ кН·м; $\alpha = 568,556 \cdot 10^3$ Н·м·с; ω – угловая скорость вращения крана.

На основании теоремы об изменении кинетического момента механической системы получено дифференциальное уравнение вращения крана

$$\frac{d}{dt} \left[(J_z + Mx^2) \omega \right] = M_{\partial}(\omega) - M_{mp},$$

где $J_z = 6,193 \cdot 10^4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – приведенный момент инерции крана относительно оси вращения z , учитывающий инерционность поворотной части крана (без груза и тележки), инерционность механизма поворота и вращающихся частей двигателя; x – текущее расстояние от тележки до оси вращения крана; $M_{\partial}(\omega) = M_{cm}(\omega)$ – приведенный к оси вращения крана движущий момент двигателя.

После несложных преобразований это дифференциальное уравнение принимает вид

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{(\alpha + 2Mxv)}{(J_z + Mx^2)} \omega = \frac{m_0}{(J_z + Mx^2)}. \quad (2)$$

Здесь $m_0 = M_{\partial 0} - M_{mp}$; $x = vt$.

Интегрирование уравнения (2), являющегося линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка, выполнено аналитически с помощью метода вариации произвольных постоянных (метода Лагранжа).

На первом этапе интегрированием однородного дифференциального уравнения

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{(\alpha + 2Mxv)}{(J_z + Mx^2)} \omega = 0$$

с использованием соотношения $\frac{d\omega}{dt} = v \frac{d\omega}{dx}$ найдено его общее решение

$$\omega = \frac{C}{J_z + Mx^2} \exp\left(-\frac{\alpha}{v\sqrt{J_z M}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{M}{J_z}} x\right), \quad (3)$$

где $C = C(x)$ – варьируемая постоянная интегрирования.

На втором этапе в результате подстановки выражения (3) в неоднородное дифференциальное уравнение (2) определена соответствующая начальным условиям ($t = 0$; $\omega = 0$; $x = x_0$; $C = 0$) постоянная интегрирования C :

$$C = \frac{m_0}{v} \int_{x_0}^x \exp\left(\frac{\alpha}{v\sqrt{J_z M}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{M}{J_z}} x\right) dx. \quad (4)$$

Частное решение дифференциального уравнения (2), выражающее зависимость угловой скорости $\omega = \omega(x)$, найдено подстановкой выражения (4) в общее решение (3):

$$\omega = \frac{m_0}{v(J_z + Mx^2)} \exp\left(-\mu \operatorname{arctg} \frac{x}{k}\right) \int_{x_0}^x \exp\left(\mu \operatorname{arctg} \frac{x}{k}\right) dx, \quad (5)$$

где $\mu = \frac{\alpha}{v\sqrt{J_z M}} = \frac{568,37 \cdot 10^3}{0,18\sqrt{4,7 \cdot 10^4 \cdot 7,5 \cdot 10^3}} = 179,5$; $k = \sqrt{\frac{J_z}{M}} = \sqrt{\frac{6,193 \cdot 10^4}{5 \cdot 10^3}} = 3,519 \text{ м}$.

При этом уравнение относительного движения тележки вдоль стрелы крана имеет вид $x = x_0 - vt$, где $x_0 = x_{\min} = 0,85$ м.

На рис. 3, 4 приведены графики зависимостей угловой скорости ω крана (5) от относительной координаты x тележки и времени t , построенные в операционной среде MathCad. Из графиков следует, что при учете линейной статической характеристики двигателя в процессе разгона крана величина угловой скорости ω монотонно возрастает и асимптотически приближается к значению $\omega_{уст} = 0,212$ рад/с, характеризующему установившийся режим вращения крана и практически равному номинальному значению $\omega_n = 0,2$ рад/с. Время разгона крана, соответствующее угловой скорости $\omega = 0,95\omega_{уст}$, составило $t_p = 0,53$ с, что меньше предельно минимального значения $[t_p] = 1$ с.

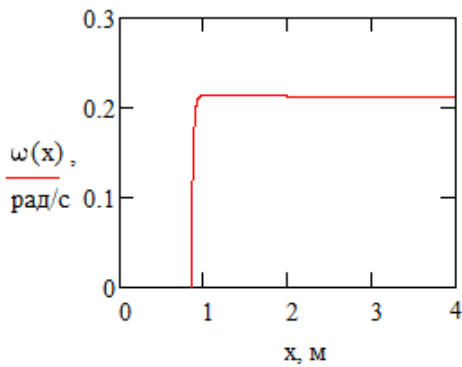


Рис. 3. График зависимости угловой скорости ω крана от относительной координаты x тележки

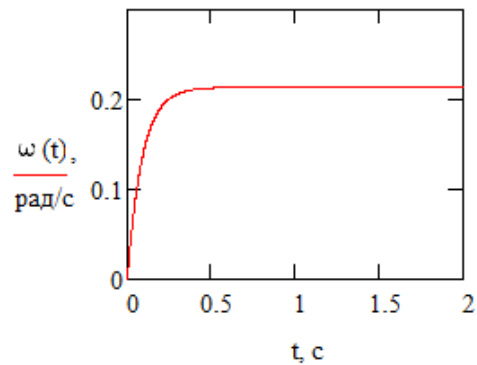


Рис. 4. График зависимости угловой скорости ω крана от времени t

Исследуем влияние динамической характеристики двигателя на движение крана в режиме разгона. В асинхронных электродвигателях действие нагрузки приводит к отставанию ротора от вращающегося магнитного поля, что в соответствующих дифференциальных уравнениях учитывается электромагнитной постоянной времени τ двигателя [4].

Дифференциальные уравнения вращения крана с учетом динамической характеристики двигателя, обусловленной его постоянной времени τ , имеют вид

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{\partial}(\omega) - 2Mxv\omega - M_{mp}}{(J_z + Mx^2)}, \quad (6)$$

$$\tau \frac{d}{dt} M_{\partial}(\omega) + M_{\partial}(\omega) = M_{cm}(\omega).$$

Здесь $M_{\partial}(\omega)$ – динамический движущий момент крана.

Дифференциальные уравнения (6) движения крана с учетом динамической характеристики электродвигателя проинтегрированы численно в среде MathCad с помощью встроенной функции Radau [5], основанной на использовании метода RADAU5, являющегося одним из наиболее эффективных методов численного интегрирования. Метод RADAU5 базируется на трехстадийном полностью неявном методе Рунге-Кутты пятого порядка точности.

Исследование вращения крана при линейной статической характеристике $M_{cm}(\omega)$ и без учета динамической характеристики двигателя показывает, что разгон

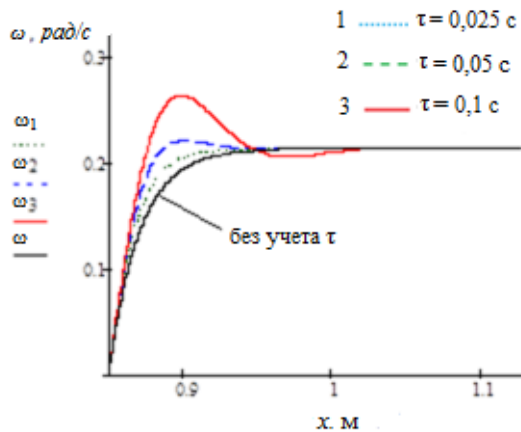


Рис. 5. Графики зависимости $\omega = \omega(x)$ при различных значениях постоянной времени τ электродвигателя

с учетом динамической характеристики двигателя при различных значениях постоянной времени τ (рис. 5) установлено, что в этом случае разгон крана представляет собой затухающий колебательный процесс и угловая скорость ω крана может достигать значений, превышающих $\omega_n = 0,2$ рад/с. Перерегулирование $\delta = (\omega - \omega_{уст}) / \omega_{уст}$ переходного процесса разгона крана при $\tau = 0,1$ с составляет 0,2. Следует отметить, что при этом с ростом τ величина δ возрастает.

На рис. 6 и 7 показаны графики зависимостей динамического $M_\delta(\omega)$ и статического M_{cm} движущих моментов приводного двигателя крана от угловой скорости ω_δ ротора двигателя и относительной координаты x тележки при различных значениях постоянной времени τ двигателя. В рассматриваемом диапазоне значений τ время разгона крана до достижения максимальной угловой скорости составляет $t_p^* = 0,2 \dots 0,4$ с, что значительно меньше $[t_p]$.

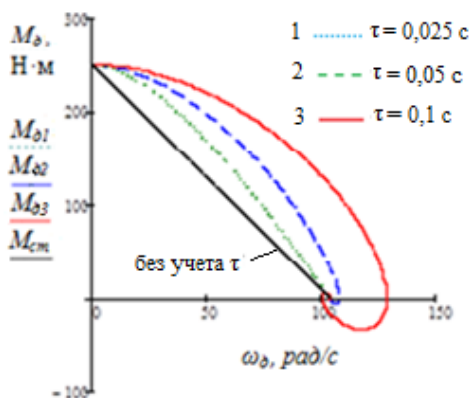


Рис. 6. Графики зависимостей $M_\delta = M_\delta(\omega_\delta)$ и $M_{cm} = M_{cm}(\omega_\delta)$ при различных значениях постоянной времени τ электродвигателя

крана является аperiodическим процессом (рис. 5). Угловая скорость крана в установившемся режиме равна $\omega_{уст} = 0,21$ рад/с, что практически равно ω_n ($\omega_{уст} = 1,065 \omega_n$).

Время разгона t_p и соответствующую относительную координату x_p тележки в первом приближении можно определить из условий

$$\omega(t_p) = \omega(x_p) = 0,99 \omega_{уст}, \quad t_p = x_p / v.$$

При этом время разгона крана составляет $t_p = 0,85$ с, что несколько меньше минимально допустимого значения $[t_p] = 1$ с. На

основании построенных кривых разгона крана

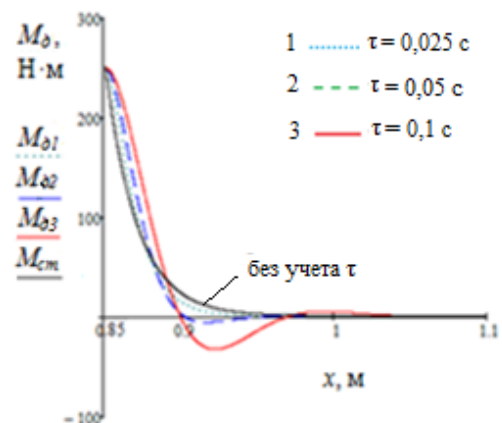


Рис. 7. Графики зависимостей $M_\delta = M_\delta(x)$ и $M_{cm} = M_{cm}(x)$ при различных значениях постоянной времени τ электродвигателя

В период разгона при линейной аппроксимации статической характеристики выявлено значительное превышение величиной вращающего момента M_δ двигателя номинального значения M_n (рис. 6). В этом случае фрикционная муфта, настроенная на номинальный момент, будет проскальзывать, что в результате приведет к интенсивному износу рабочих поверхностей ее дисков и потере мощности двигателя. Кроме того, установлено, что при $\tau = 0,05$ с и $\tau = 0,1$ с момент M_δ двигателя оказывается знакопеременным (рис. 6 и 7). Это вызывает изменение направления передаваемого зубчатыми колесами момента, а следовательно, и перекадку зазоров в зубчатой передаче, что весьма нежелательно [2].

Таким образом, исследование движения крана при разгоне с учетом линейной статической характеристики двигателя и постоянной времени τ выявляет перерегулирование δ переходного процесса движения крана и знакопеременность движущего момента M_δ , приводящие к потере мощности двигателя, а также к снижению работоспособности механической передачи.

Для более точного анализа переходного процесса разгона крана представим механическую характеристику $M_{cm}(\omega_\delta)$ в виде билинейной функции.

Механическая характеристика $M_{cm}(\omega_\delta)$ асинхронного двигателя 4AC90LE6 характеризуется пусковым моментом $M_n = 33$ Н·м и критическим моментом $M_{кр} = 37$ Н·м, соответствующим угловой скорости

$$\omega_{кр} = \omega_{xx} - \frac{M_{\delta кр}}{M_n} (\omega_{xx} - \omega_{\delta н}) = 104,7 - \frac{37}{17,5} (104,7 - 97,4) = 89,27 \text{ рад/с.}$$

Первый участок билинейной статической характеристики ($0 \leq \omega_\delta \leq \omega_{кр}$) описывается выражением

$$M_{cm}(\omega_\delta) = M_n - \frac{M_{кр} - M_n}{\omega_{кр}} \omega_\delta = 33 - \frac{37 - 33}{89,27} \omega_\delta = 33 - 0,0448 \omega_\delta \text{ Н·м,}$$

а второй участок ($\omega_{кр} \leq \omega_\delta \leq \omega_{xx}$) – выражением

$$M_{cm}(\omega_\delta) = \frac{M_n}{(\omega_{xx} - \omega_{\delta н})} (\omega_{xx} - \omega_\delta) = \frac{17,5}{(104,7 - 97,4)} (104,7 - \omega_\delta) = 250,993 - 2,397 \omega_\delta \text{ Н·м.}$$

Полная билинейная статическая характеристика двигателя 4AC90LE6 приведена на рис. 8.

Результаты исследования влияния билинейной характеристики $M_{cm}(\omega_\delta)$ при различных значениях постоянной времени τ двигателя, полученные численным интегрированием дифференциальных уравнений (6), показали, что в период разгона крана имеется некоторое перерегулирование δ переходного процесса, но оно оказывается значительно меньшим, чем при линейной статической характеристике двигателя. Так, при билинейной характеристике $M_{cm}(\omega_\delta)$ для постоянной времени $\tau = 0,1$ с перерегулирование δ составило лишь 0,033, а время разгона t_p до достижения максимальной угловой скорости при варьируемых значениях τ оказалось примерно равным 6 с (рис. 9).

Анализ графиков зависимости $\omega = \omega(x)$ (рис. 9) с учетом равномерного относительного движения грузовой тележки $x = vt = 0,18t$ м/с по стреле крана показывает, что вращение консоли крана в режиме разгона со сравнительно небольшой погрешностью можно считать равноускоренным, как это принято при расчете механизма поворота крана в работе [3].

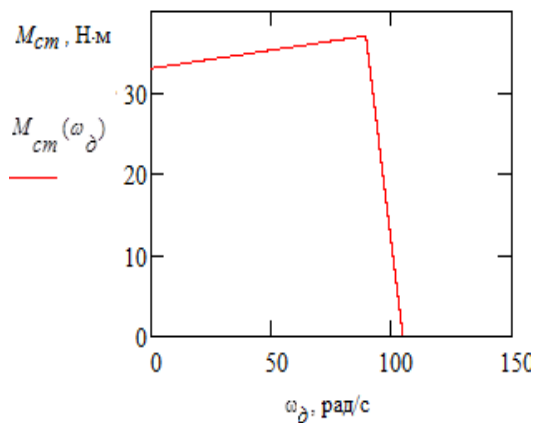


Рис. 8. Билинейная статическая характеристика асинхронного электродвигателя 4AC90LE6

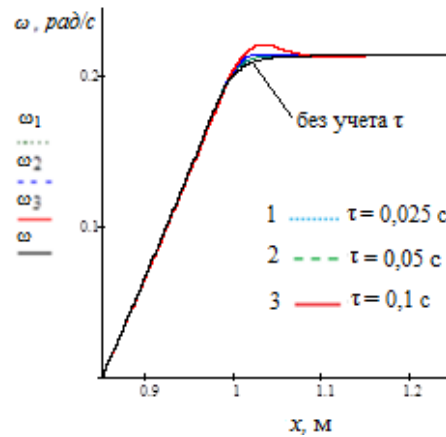


Рис. 9. Графики зависимости $\omega = \omega(x)$ при различных значениях постоянной времени τ (билинейная статическая характеристика)

Важно отметить, что угловая скорость вращения крана при установившемся режиме не зависит от τ и получается такой же, как при учете линейной статической характеристики, т.е. $\omega_{уст} = 1,065 \omega_H$ (рис. 5, 9). Кроме того, так же как и при линейной статической характеристике, максимальная величина M_δ^{max} вращающего момента двигателя превышает номинальный момент M_H (рис. 10, 11). При этом величина M_δ^{max} оказывается даже несколько меньшей критического момента $M_{кр}$ двигателя. Однако в период разгона динамический момент M_δ двигателя может менять знак, что, как было отмечено выше, нежелательно. Так, в выполненном расчете выявлена знакопеременность M_δ при $\tau = 0,1c$ (рис. 10, 11). В связи с этим исследование разгона крана целесообразно выполнять, используя билинейную аппроксимацию статической характеристики $M_{cm}(\omega_\delta)$ двигателя, с учетом соответствующего (конкретного) значения его постоянной времени τ . Анализ установившегося движения крана можно проводить с использованием линейной характеристики $M_{cm}(\omega_\delta)$ приводного асинхронного двигателя без учета его постоянной времени τ .

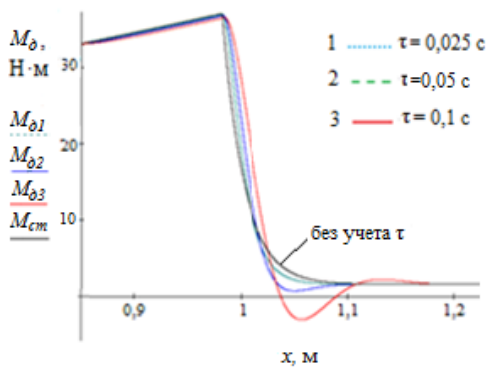


Рис. 10. Графики зависимостей $M_\delta = M_\delta(x)$ и $M_{cm} = M_{cm}(x)$ при различных значениях постоянной времени τ (билинейная статическая характеристика)

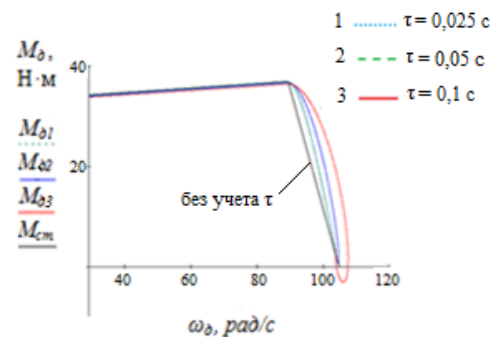


Рис. 11. Графики зависимостей $M_\delta = M_\delta(\omega_\delta)$ и $M_{cm} = M_{cm}(\omega_\delta)$ при различных значениях постоянной времени τ (билинейная статическая характеристика)

Отметим, что некоторые отрицательные динамические эффекты (такие как перерегулирование δ переходного процесса и недопустимо малое время разбега t_p^* крана до достижения максимальной угловой скорости), вызываемые динамической характеристикой двигателя, при билинейной статической характеристике с увеличением скорости v относительного движения тележки усугубляются, а размах колебаний динамического момента в переходном процессе уменьшается. Так, при $v = 0,8$ м/с в рассматриваемом диапазоне значений τ максимальная величина перерегулирования при $\tau = 0,1$ с составляет $\delta = 0,055$, а время разгона до достижения максимальной угловой скорости ω_{\max} крана $t_p^* = 0,3$ с, что значительно меньше допустимого $[t_p]$, однако знакопеременность динамического момента двигателя M_δ не возникает.

В заключение подчеркнем, что подобного рода анализ целесообразно выполнять применительно к поворотным кранам и иным модификаций, оснащенным асинхронными приводными электродвигателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брауде, В.И. Вероятностные методы расчета грузоподъемных машин / В.И. Брауде. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с.
2. Комаров, М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров. – М.: Машиностроение, 1989. – 267 с.
3. Ермоленко, В.А. Расчет механизма поворота крана на колонне: метод. указания / В.А. Ермоленко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 32 с.
4. Коловский, М.З. Динамика машин / М.З. Коловский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 263 с.
5. Плис, А.И. МATHCAD 2000. Математический практикум для экономистов и инженеров: учеб. пособие / А.И. Плис, Н.А. Сливина. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 656 с.

Материал поступил в редколлегию 10.10.14.