

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЛИМИТИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА С РЕГУЛЯТОРАМИ СОСТОЯНИЯ

**Введение.** Быстродействие приводов, как известно, определяет производительность механизмов и точность их работы, то есть количество и качество продукции или процесса. Современные промышленные транзисторные асинхронные и другие ЭП, обеспечивая существенно более широкую полосу пропускания, нежели тиристорные, уже не являются жестким лимитирующим фактором быстродействия. Поэтому производить настройки их контуров регулирования приходится, учитывая особенности всей электромеханической системы. Если таких особенностей анализируемого объекта много, то наиболее быстрым приемом определения предельной полосы пропускания контуров ЭП становится моделирование глубоко детализированной электромеханической системы. На примере ЭП перемещения мостового крана покажем результаты реализации такого подхода.

**Постановка задач исследования.** В статьях [1] и [2] представлены материалы разработки модели механизмов перемещения мостового крана с САР, обеспечивающей подавление колебаний груза. Груз промоделирован как маятник в трехмерном пространстве на упругой нити подвеса с возможностью учета ветровых нагрузок и перемещения точки подвеса одновременно по двум координатам в горизонтальной плоскости (мост и тележка). Электроприводы приняты асинхронными с векторным управлением. Контур регулирования моментобразующего тока принят безынерционным, регулятор скорости - пропорциональным с ограничением момента (тока). Дополнительный ПИ-регулятор и обратные связи по необходимым координатам образуют систему с регулятором состояния и наблюдателем. Последние были синтезированы при ряде упрощений: в них не учтены перекрестные связи между ЭП моста и тележки, нелинейность маятникового подвеса, упругость грузового каната. Расчеты динамических процессов, выполненные для крана КМ.8001.00.000 Харьковского завода ПТО, показали, что в такой системе можно вдвое повысить полосу пропускания САР и одновременно подавить качания груза ( по сравнению с исходной недемпфированной нерегулируемой системой). Однако, для определения предельного быстродействия таких ЭП следует учесть влияние других лимитирующих факторов посредством моделирования.

**Материалы исследования.** Рассмотрим перечень и дадим краткую характеристику основных лимитирующих факторов быстродействия ЭП механизмов перемещения крана. К ним отнесем следующие:

1. Ограничение по реализуемому моменту двигателя при его установленной мощности.
2. Ограничение по реализуемому моменту двигателя при перспективе превышения установленной мощности (в системе с векторным управлением принимаем  $\lambda=2.5\div 3$ ).
3. Ограничение по причине проявления нелинейных свойств маятникового подвеса в системе с регулятором состояния, рассчитанным по линеаризованной модели объекта регулирования.
4. Ограничения, вызванные возможным переходом в автоколебательный режим в силу наличия нелинейности типа ограничения в регуляторе скорости ЭП.
5. Ограничение по силе сцепления колес с рельсами (коэффициент  $\psi=0.2$  в помещении). Колеса не должны срываться в юз и пробуксовку как при двух ведущих колесах, так и при четырех.
6. Ограничения, вызванные возможным переходом крана в аварийный режим «полетов груза» на пружинящем канате как вследствие резкого ускорения тележки (моста), так и в силу неучета упругих свойств грузового каната при синтезе регулятора состояния.
7. Ограничения по динамическим усилиям каната при форсированном старте моста с номинальным весом груза.
8. Ограничение по реализуемой скорости ЭП  $\omega \leq \omega_{ном}$  в однозонном векторном приводе при наличии дополнительных обратных связей по состоянию объекта по каналу задания и каналу возмущения.

Ряд других лимитирующих быстродействие факторов быстродействия следует рассматривать в отдельной разработке. К ним отнесем ограничение, обусловленное недостаточностью запаса по напряжению в звене постоянного тока преобразователя системы с векторным управлением; упругий прогиб балки моста при форсированном пуске крана с номинальным грузом в середине пролета; влияние упругости валов между колесами и приводными двигателями (если они имеются, в старых кранах); неидентичность моментных характеристик двигателей (электроприводов) и неидеальность системы устранения перекосов моста при движении; ограничения по частоте квантования и разрядности АЦП в системе с предложенным [2] наблюдателем при его реализации средствами PLC SIMATIC S7-300, S7-400 или платы Т-400, особенно с учетом больших значений коэффициентов коррекции наблюдателя при высоком быстродействии; ограничение по допустимому темпу изменения задания на скорость электроприводов Micromaster 440 и Simovert, превышение которого приводит к отключению ЭП и высвечиванию соответствующего кода ошибки. Ограничения, обусловленные экономической целесообразностью (например, целесообразность некоторого превышения установленной мощности двигателя

или установки трансформатора для повышения запаса по напряжению), а также ограничения технологически нормируемых величин тоже могут быть приняты к рассмотрению в ходе определения максимальной полосы пропускания ЭП для их учета в ходе последующих пуско-наладочных работ.

Расчет динамических процессов проведем так, чтобы иметь возможность оценить степень влияния на полосу пропускания таких двух нелимитирующих, но важных факторов, как:

- а) величина жесткости грузового каната (тип каната - нормальный или с повышенной жесткостью);
- б) трение в ребордах колес о рельсы моста и тележки.

При этом будем рассматривать два различных режима работы ЭП механизма: с задатчиком интенсивности и без него. Одновременно будем отслеживать величину угла отклонения каната от вертикали.

Результаты определения максимальной полосы пропускания, которую фиксирует каждый из факторов по возможности, вне связи с другими, найдем в ходе моделирования и представим в итоговой таблице 1. При этом рассмотрим четыре крайних конфигурации модели: «тяжелый груз на длинном канате»(ТГДК), «легкий груз на длинном канате»(ЛГДК), «тяжелый груз на коротком канате»(ТГКК), «легкий груз на коротком канате»(ЛГКК).

Таблица 1

А	Полоса пропускания	Наличие модели лимитирующего фактора в модели крана										Б		В	Г				Д
		1	2	3	4*	5*	6*	7*	8*	9	10	а	б		ТГДК	ЛГДК	ТГКК	ЛГКК	
3	$\omega_{o\_unlim}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	Н	-	-	0.28	0.26	0.64	0.62	3
3	$\omega_{o\_unlim}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	Н	-	+	0.35	0.32	1.01	0.98	1
3	$\omega_{o\_unlim}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	Ж	-	-	0.22	0.20	0.53	0.51	3
3	$\omega_{o\_unlim}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	Н	+	-	0.28	0.26	0.64	0.62	3
3	$\omega_{o\_unlim}$	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	Н	-	-	0.27	0.25	0.64	0.62	3
3	$\omega_{o\_unlim\_2}$	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	Н	-	-	3.2	2.5	4.3	3.9	8
3	$\omega_{o\_unlim\_2}$	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-	Н	-	-	3.2	2.5	4.3	3.9	7
3	$\omega_{o\_unlim\_2}$	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	Н	-	+	10.2	5.8	37	24	2
3	$\omega_{o\_lim}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	Н	-	-	0.31	0.28	0.7	0.69	4
3	$\omega_{o\_lim}$	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	Н	-	+	0.39	0.31	1.05	1.02	4
4	$\omega_{o\_nelin}$	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	Н	-	-	0.16	0.15	0.25	0.24	**
4	$\omega_{o\_nelin\_2}$	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	Н	-	-	0.21	0.2	0.44	0.43	**
4	$\omega_{o\_nelin\_2}$	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	Н	-	+	0.35	0.34	0.63	0.61	**
4	$\omega_{o\_nelin\_2}$	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	Н	-	-	0.21	0.2	0.44	0.43	2
5	$\omega_{o\_пробукс}$	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Н	-	-	0.11	0.07	0.33	0.29	1
5	$\omega_{o\_пробукс}$	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	Ж	-	-	0.11	0.07	0.33	0.29	1
5	$\omega_{o\_пробукс}$	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	Н	-	+	0.25	0.22	0.87	0.81	1
5	$\omega_{o\_пробукс}$	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	Н	-	-	-	-	-	-	-
6	$\omega_{o\_fly}$	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	Н	-	-	0.27	0.24	0.6	0.59	2
6	$\omega_{o\_fly}$	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	Н	-	-	-	-	-	-	-
6	$\omega_{o\_fly}$	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	Ж	-	-	0.23	0.2	0.51	0.57	2

А – номер исследуемого лимитирующего фактора быстрогодействия (см. текст статьи)

Б – нелимитирующие факторы

а - величина жесткости грузового каната (тип каната - нормальный или с повышенной жесткостью)

б - трение в ребордах колес о рельсы моста и тележки

В – наличие в системе задатчика интенсивности

Г – значение предельной полосы пропускания САР скорости при различных параметрах кинематической схемы крана, Гц.

Д – максимальный угол отклонения каната от вертикали, градусов

\*- лимитирующий фактор отслеживается, но его превышение не приводит к изменению в модели

\*\* - моделирование проведено при реализации модального регулятора на линеаризованной модели маятника без фиксации угла отклонения.

Оценка динамических свойств системы проводилась в двух основных вариантах построения модели САР: при неограниченном электромагнитном моменте двигателя (теоретический вариант) и при введенном ограничении на эту величину (с учетом реальных возможностей привода).

Первый вариант позволяет оценить предельные (по полосе пропускания) возможности модального регулятора, синтезированного для объекта с упрощенной линеаризованной моделью трехмерного маятника (система «груз-канат»), а реализуемого на неупрощенной модели крана. Было выявлено, что максимальная полоса пропускания такой системы  $\omega_{o\_unlim}$  (при биномиальной настройке САР) в первом приближении кратно пропорциональна частоте свободных колебаний груза на канате, т.е. быстродействию САР, замкнутой через предложенный модальный регулятор, определяется, в основном, длиной каната. Максимальная полоса пропускания такой САР приблизительно в 1.5-1.7 раза выше частоты свободных колебаний груза на канате. При моделировании же системы с полосой пропускания, близкой к  $\omega_{o\_unlim}$ , в ее элементах наблюдалось многократное возрастание динамических усилий колебательного характера (момент двигателя, сила упругости каната). При  $\omega_o > \omega_{o\_fly}$  груз периодически находится в состоянии свободного полета, что, естественно, недопустимо. Анализ показал, что такая реакция объекта обусловлена тем, что на этапе синтеза модального регулятора для линеаризованной модели «груз-канат» для упрощения структуры САР из рассмотрения были исключены упругие свойства каната. В силу наличия в составе модального регулятора положительной обратной связи по проекции силы упругости каната это и приводит к потере устойчивости системой в малом. Соответствующие графики показаны на рис. 1.

Как показали результаты моделирования, расчетные задаваемые при синтезе значения среднегеометрического корня можно увеличить в 6-8 раз ( $\omega_{o\_unlim\_2}$ ), если разорвать указанную обратную связь. Это устранило неустойчивость, однако нарушит настройки модального регулятора и не приведет к возрастанию быстродействия САР. Графики динамических процессов такой системы показаны на рис. 2.

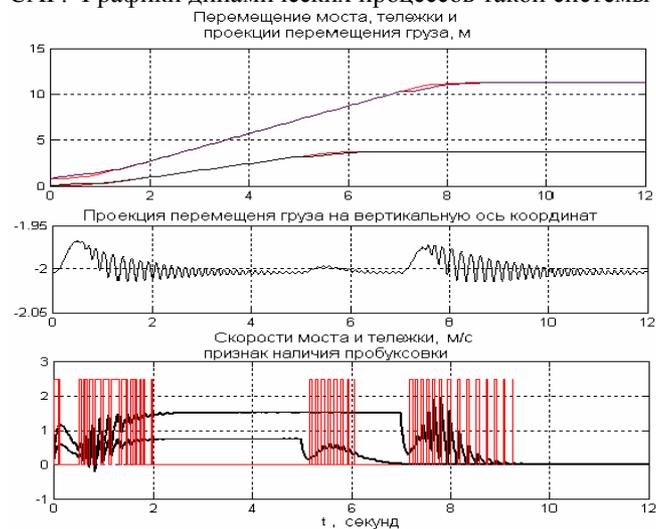


Рис.1. Моделирование режима 3 ( $\omega_{o\_unlim}$ ); тип модели крана – ТГКК,  $\omega_o=2*\pi*(0.28 \text{ Гц})$  (полоса пропускания, близкая к полосе пропускания  $\omega_{o\_unlim}$ , при которой имеет место потеря устойчивости системой); «полеты» груза; пробуксовка

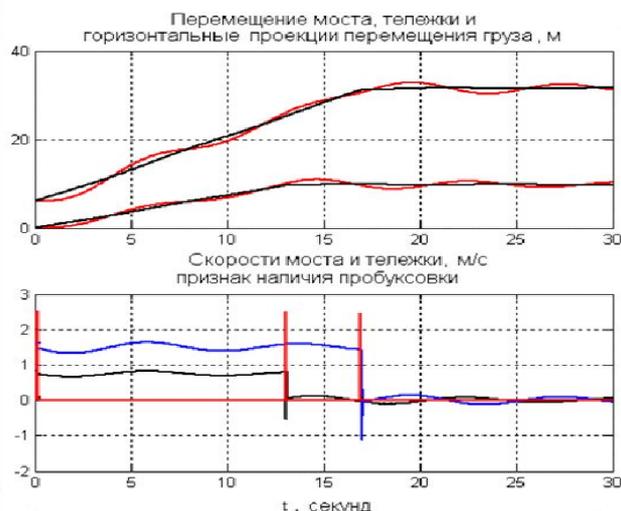


Рис.2. Моделирование режима 9 ( $\omega_{o\_unlim\_2}$ ); тип модели крана – ТГДК,  $\omega_o=2*\pi*(3 \text{ Гц})$ ; время полного нарастания скорости  $t=0.05 \text{ с}$ ; пробуксовка

Коэффициент жесткости каната в пределах его стандартных значений не оказывает существенного влияния на поведение объекта: повышение его порядка приводит к уменьшению полосы пропускания САР примерно в 1,2 раза.

Оценка ограничения полосы пропускания, обусловленного возможностью пробуксовки колес, показала следующее. В системе без ограничения на момент двигателя срыв в пробуксовку возникает при полосе пропускания при  $\omega_o \geq \omega_{o\_пробукс}$ . Поэтому, возможность возникновения пробуксовки является существенным лимитирующим фактором быстродействия в системе с неограниченным моментом привода, однако она не проявляется при работе приводов с ограниченным моментом в случае их типовых мощностей и настроек.

Анализ системы с введенным ограничением на момент привода показал, что при различных сочетаниях параметров возможна потеря устойчивости вследствие влияния упругости каната на поведение системы с САР, синтезированной для линеаризованной системы ( $\omega_{o\_lim}$ , как ЭП без ограничения), а также вследствие наличия нелинейности типа ограничения в регуляторах скорости ( $\omega_{o\_нелин}$ ). Интересно, однако, что ограничение момента привода на уровне  $M=3*M_{пробукс}$ , где  $M_{пробукс}$  – момент, необходимый для срыва в пробуксовку, формально позволяет увеличить полосу пропускания до значения  $\omega_{o\_lim} = 1.5 \cdot \omega_{o\_unlim}$  (режим 10 в таблице).

Проверка системы на возможность перехода в автоколебательный режим с недопустимо большими амплитудами скорости в силу нелинейностей (в частности, ограничения на электромагнитный момент) осуществлялась при реализации модального регулятора на линеаризованной системе «груз-канат» (без учета упругости),

для которой он был синтезирован. Значения максимально допустимой полосы пропускания  $\omega_{o\_nlin}$  (для системы с ограничением  $M=M_{ном}$ )  $\omega_{o\_nlin 2}$  (для системы с ограничением  $M=3 \cdot M_{ном}$ ) приведены в таблице (также см. рис. 3, 4), причем  $\omega_{o\_nlin} < \omega_{o\_nlin 2} < \omega_{o\_unlim}$ .

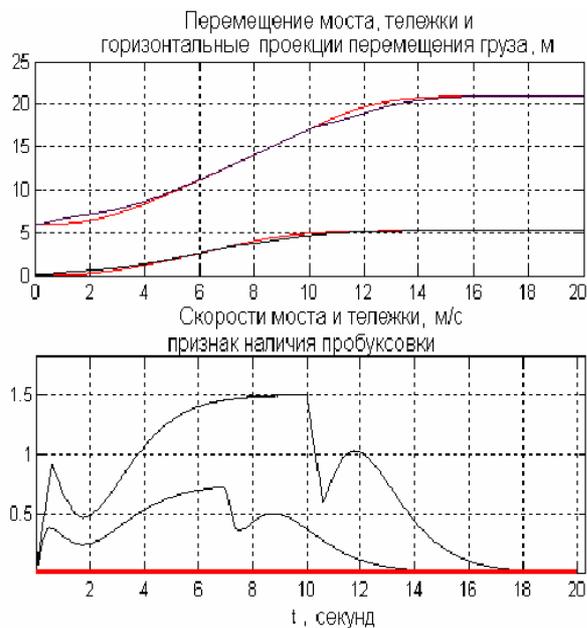


Рис.3. Моделирование режима 4 ( $\omega_{o\_nlin 2}$ ); тип модели крана – ТГДК.  $\omega_o=2 \cdot \pi \cdot (0.15 \text{ Гц})$ ; момент не выходит на насыщение

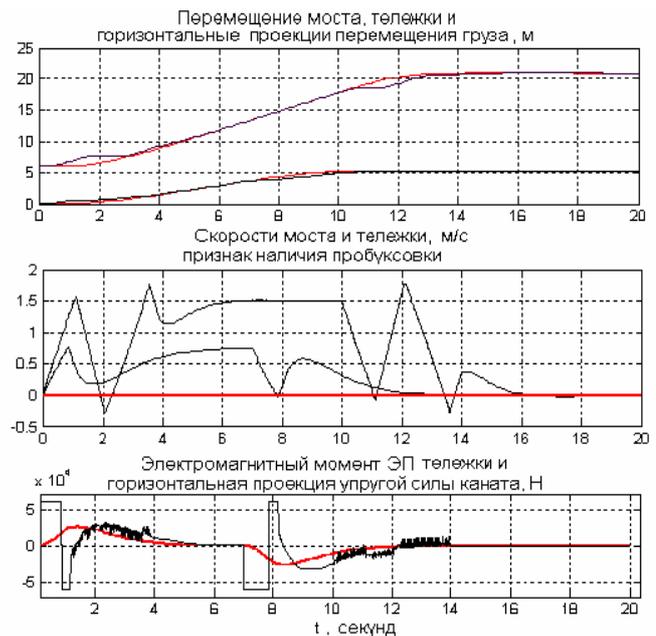


Рис.4. Моделирование режима 4 ( $\omega_{o\_nlin 2}$ ); тип модели крана – ТГДК.  $\omega_o=2 \cdot \pi \cdot (0.27 \text{ Гц})$  (полоса пропускания, близкая к полосе пропускания  $\omega_{o\_nlin 2}$ , при которой имеет место входжение в режим автоколебаний); момент выходит на насыщение

Исследование поведения системы с учетом других вариантов конфигурации ее модели дало следующие результаты:

- Использование задатчика интенсивности с временем нарастания  $t=5$  с позволяет повысить полосу пропускания замкнутой САР скорости с регулятором состояния в 1,5-2 раза (по сравнению с разгоном САР под отсечку).
- Сила трения качения колес и сила трения реборд колес о рельсы моста и тележки не оказывают заметного влияния на динамику рассмотренной САР без наблюдателя в вышеуказанных пределах изменения ее полосы пропускания. Вместе с тем следует отметить, что как показано в [2], силы трения в ребордах весьма значительны при относительно высокой полосе пропускания наблюдателя в САР с ним в силу наличия алгебраических контуров.
- В моделях как с ограниченным, так и с неограниченным электромагнитным моментом подавление колебаний груза обеспечивается без превышения номинальной скорости вращения ротора для всех рассмотренных случаев.
- Угол отклонения груза от вертикали при максимальной полосе пропускания  $\omega_{o\_unlim 2}$  не превышает  $8^\circ$ .

На рис.1, 2, 3, 4 показаны графики, отображающие изменения выходов контрольных приборов, фиксирующих в модели превышение допустимых уровней силы трения сцепления, момента двигателя и других переменных. Уровень сигнала, равный 2.5, соответствует фиксации превышения.

**Выводы:** В статье выделены основные лимитирующие факторы быстрого действия ЭП мостового крана. Наиболее существенные из них исследованы на его ранее разработанной модели. Найдены и сведены в итоговую таблицу значения предельной полосы пропускания САР скорости моста и тележки. Выявлен эффект и причина неустойчивости САР в малом при реализации астатического модального регулятора, синтезированного по линейаризованной модели. Определено, что главным лимитирующим фактором быстрого действия является ограничение момента в регуляторе скорости.

#### Литература.

1. Осичев А.В., Королева О.В. Модель трехмерного упруго подвешенного маятника с перемещающейся в пространстве точкой подвеса. Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». 2004. №43. С. 71-72.
2. Osichev A.V., Korolyova O.V. On design of traveling overhead crane 3-dimensional model with anti-swing control system and its dynamics analysis.// Респ. міжвід. наук.-техн. зб. «Електромашинобудування та електрообладнання». –Київ: «Техніка», – 2006. Вип. № 66. – С. 141-142.