

УДК 61-932,4

ФОРМИРОВАНИЕ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ЗАТВОРА СЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ПРИ ТРОГАНИИ

О. А. Хребтова, С. А. Сергиенко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: 34092@ukr.net

Рассмотрены особенности формирования сил и моментов сопротивлений при подъеме затвора сливной плотины с учетом эксплуатационных и конструктивных особенностей технологического оборудования. По приведенным математическим зависимостям рассчитан момент сопротивления системы «электропривод–трансмиссия механизма подъема–рабочая среда» при выполнении трогания и пуска. По результатам математического моделирования построены временные зависимости при трогании с учетом свойств системы и при классических составляющих момента сопротивления. На базе рассмотренных этапов трогания и пуска, с учетом особенностей формирования момента сопротивления во время эксплуатации технологического механизма, при применении минимизации усилий разрушения адгезивных слоев рабочего органа сформулированы требования к системе управления двухдвигательного электропривода технологического механизма для выполнения предпусковой подготовки, трогания и перемещения затвора по направляющим кармана.

Ключевые слова: трогание, силы сопротивления, адгезивные соединения.

ФОРМУВАННЯ МОМЕНТУ ОПОРУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДВОДВИГУНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ЗАТВОРА ЗЛИВНОЇ ГРЕБЛІ ПРИ РУШАННІ

О. А. Хребтова, С. А. Сергиенко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: 34092@ukr.net

Розглянуто особливості формування сил і моментів опорів при підйомі затвора зливної греблі з урахуванням експлуатаційних і конструктивних особливостей технологічного устаткування. За наведеними математичними виразами розраховано момент опору системи «електропривод–трансмисія механізму підйому–робоче середовище» при виконанні рушання й пуску. За результатами математичного моделювання побудовано часові залежності при рушанні з урахуванням властивостей системи й при класичних складових моменту опору. На базі розглянутих етапів рушання й пуску, з урахуванням особливостей формування моменту опору під час експлуатації технологічного механізму, при застосуванні мінімізації зусиль руйнування адгезивних шарів робочого органу сформульовано вимоги до системи керування дводвигунового електроприводу технологічного механізму для виконання передпускової підготовки, зрушення й переміщення затвора по напрямних кишені.

Ключові слова: рушання, сили опору, адгезивні з'єднання

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Все группы промышленных механизмов условно могут быть разделены на два класса. К первому классу могут быть отнесены производственные механизмы, электромашинные преобразовательные агрегаты, которые запускаются вхолостую, т.е. без технологической нагрузки. Их запуск характеризуется повышенным моментом трогания, который формируется в кинематических парах неподвижных и вращающихся частей и описывается физическими зависимостями, учитывающими характер контактирующих поверхностей, вязкость смазки и т.п. [1–3].

Другой класс механизмов характеризуется тем, что при трогании и пуске момент создается не только силами трения в кинематических парах, но и силами взаимодействия рабочего тела с рабочим органом (момента трения рабочего колеса насоса с водой, нефтью, разжиженной компонентой минерального сырья) [1–3].

Из работ [2, 4, 5] известно, что значительная часть общепромышленных и сельскохозяйственных механизмов имеет начальный статический момент сопротивления технологического агрегата (момент

трогания), превосходящий статический момент сопротивления в момент трогания агрегата с места.

Вопросы представления реальных зависимостей момента сопротивления некоторых рабочих машин от поворота вала электропривода, которые лишь приблизительно могут быть описаны с помощью известной эмпирической формулы Бланка, также были рассмотрены в работе [6].

По результатам исследований определено, что в реальных условиях зависимость $M_c(\omega)$ имеет более сложный характер: $M_c(\omega) = M_0 + k(\omega/\omega_n)^p + M_p(\varphi)$, где $M_p(\varphi)$ – зависимость момента трогания от угла поворота вала φ , что в свою очередь зависит от времени t , в течение которого агрегат находится в неподвижном состоянии, свойств масла ν , температуры окружающей среды $t^\circ C$, характеристик рабочего тела и т.д. и $M_p(\varphi) = F(t, \nu, t^\circ C, \dots)$. Именно $M_p(\varphi)$ имеет стохастический характер и формирует пусковой момент сопротивления. Однако в настоящее время вопросы трогания в тяжелых условиях с учетом особенностей эксплуатации технологических меха-

низмов рассмотрены только для электроприводов турбомеханизмов и электротранспорта [6, 7].

Существует ряд технологических механизмов, которые при определенных условиях эксплуатации имеют нелинейную зависимость момента трения и характеризуются троганием электропривода в тяжелых условиях, – это подъемно-транспортные механизмы, выполняющие подъем габаритных грузов, такие как перегружатели на железотранспортных объектах, подъемники на парамах, в речпортах и т.д. [8, 9].

Одним из примеров электропривода подъемно-транспортного механизма, который выполняет подъем груза с троганием в тяжелых условиях, являются вспомогательные технологические механизмы гидроэлектростанций (ГЭС), а именно козловой кран 2х150 т, выполняющий подъем/установку затвора в карман сливной плотины. Внешний вид козловой крана и затвора представлен на рис. 1, а и рис. 1, б соответственно.



а)

б)

Рисунок 1 – Внешний вид вспомогательного технологического механизма:

а) вид козловой крана с нижнего бьефа: 1 – ремонтная площадка; 2 – кабинка управления краном; 3 – кабинка механизма подъема; 4 – траверса; 5 – карман сливной плотины; б) внешний вид секции затвора сливной плотины

Козловой кран находится на ремонтной площадке и передвигается по железнодорожным путям на отметке верхнего бьефа, обеспечивая выполнение плановых и аварийных ремонтных работ.

Электродвигатели механизма подъема (2 x 45 кВт, 380 В, 585 об/мин) приводят в движение две подъемные лебедки. На рис. 2 приведена схема двухдвигательного электропривода механизма подъема.

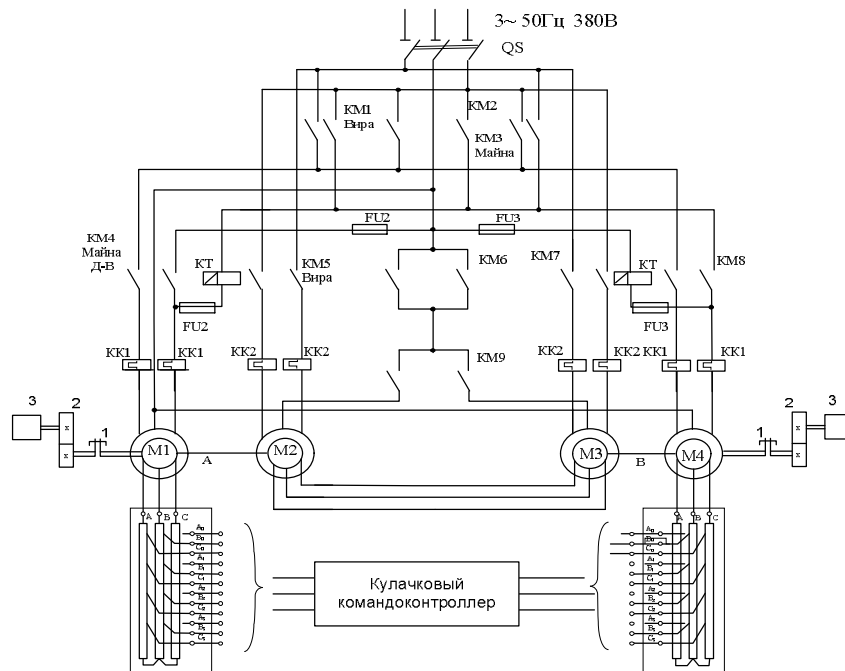
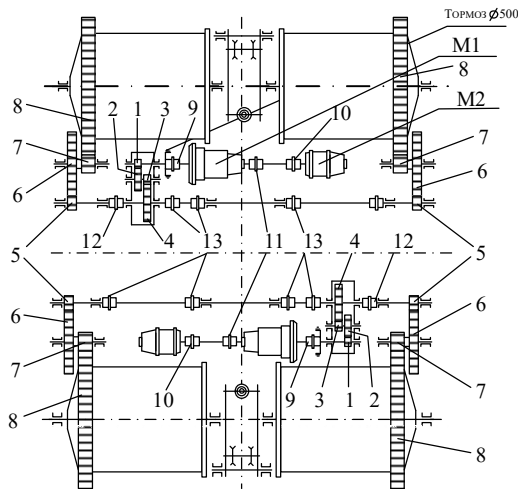


Рисунок 2 – Электропривод механизма подъема:
1 – соединительные муфты; 2 – зубчатые передачи;
3 – подъемные лебедки приводов А и В

Электропривод предусматривает два основных режима работы: 1) синхронное вращение машин М1 и М4, агрегирован с соответствующей машиной М2, М3 электрического вала; 2) независи-

мое вращение валов А и В при размыкании электрического вала.

Электропривод механизма подъема представляет собой сложную кинематическую цепь (рис. 3).



	ПЕРЕДАЧИ								МУФТА ЗУБЧАТАЯ				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ЧИСЛО ЗУБЬЕВ	27	127	21	79	15	69	16	114	М7	2375,7 -32,30	2375,7 -32,30	Н7	У7
МОДУЛЬ НОРМ.	4,5		10		20		26						

Рисунок 3 – Кинематическая схема механизма подъема с таблицей параметров передач и зубчатых муфт

По условию эксплуатации параметры кинематических пар каждой лебедки должны совпадать, обеспечивая устойчивость работы системы «электрический вал» (рис. 2). За время эксплуатации трансмиссии электроприводов неоднократно ремонтируются и подвергаются износу, что является источником формирования разных значений передаточного числа трансмиссии обоих механизмов. Формирование угла рассогласования при повороте валов лебедок в функции жесткости канатов с учетом передаточного числа влияет на формирование значительной неравномерности распределения нагрузки на приводные машины, что, в свою очередь, является источником разрушения устойчивой работы системы «электрический вал» [10–13].

При выполнении технологических операций в процессе подъема практически каждый раз происходит поломка оборудования электропривода [11].

Анализ сведения о выходе из строя электротехнического и технологического оборудования при подъемах затворов сливной плотины, зафиксированных в вахтенных журналах за последние десять лет, показал, что основными причинами являются значительные пусковые токи и, как следствие, значительные ударные моменты.

Перечисленные факторы служат основанием для выполнения анализа физико-химических процессов, возникающих в элементах технологического механизма при выполнении трогания в первоначальный момент времени и являющихся составляющими момента сопротивления рабочего органа.

Целью данной работы является определение факторов формирования момента сопротивления для учета их при создании системы электропривода, обеспечивающей выполнение трогания, пуска и синхронного перемещения затвора по направляющим кармана со снижением аварийности и увеличе-

нием энергоэффективности электротехнического комплекса механизма подъема сливной плотины.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Трогание и пуск системы «электродвигатель-технологический механизм» можно разделить на три этапа.

Первый этап – предпусковая подготовка – неподвижный технологический механизм, характеризующийся силами трения покоя между взаимно неподвижными элементами электромеханической системы, а именно: рабочей среды, рабочего органа и кинематической цепью электропривода, формирующие момент сопротивления, который прикладывается в точке соединения недвижимого рабочего элемента и вала электропривода [16, 17], и силами адгезии, произошедшей в процессе эксплуатации между основанием затвора и основанием кармана сливной плотины [18, 19].

Второй этап – трогание – переход из неподвижного состояния рабочего органа в состояние движения и выход на заданный режим работы системы.

И третий этап – это синхронное перемещение затвора по направляющим кармана при исключении перекосов в кармане и обеспечения компенсации неравномерностей моментов сопротивления при движении затвора по направляющим.

В большинстве технической и научной литературы вопросы динамики электропривода рассматриваются при условии неизменности сопротивления нагрузки $M_c(\omega) = const$. Однако для рассматриваемых механизмов математическое описание пусковых механических характеристик имеет другой вид и может быть представлен нелинейной функцией [7].

Пуск представлен как процесс, когда электропривод механизма непосредственно переходит в движение, а трогание, как составляющая пуска и как

переход электропривода технологического механизма из состояния покоя в состояние движения, не рассматривается вообще, следовательно, и силы, формирующие момент сопротивления при состоянии покоя именно технологического механизма, не анализируются и не учитываются при формировании пускового момента трогания. Поэтому для разработки методов и алгоритмов трогания и пуска двухдвигательным приводом необходимо учитывать факторы, которые формируют момент сопротивления при трогании.

Затвор (рис. 1,б) представляет собой металлоконструкцию весом 164 т при общем габарите 16х16,5х1,2 м, состоящую из трех неравномерных секций. На время ремонта функцию основного затвора временно выполняет аварийный затвор, который устанавливается со стороны верхнего бьефа на расстоянии около одного метра от основного затвора. Для подъема затвора с рабочего места необходимо произвести подъем на 0,25–0,3 м. После удачного подъема сливается остаточный объем воды. Поднимается затвор на высоту первой секции, вынимаются пальцы, снимается первая секция и отвозится на ремонтную площадку. По аналогии происходит подъем и перевоз оставшихся секций.

Значение силы тяжести затвора рассчитывается с учетом воздействия воды по выражению

$$F_3 = (m_3 + m_6)g, \quad (1)$$

где m_3 – масса затвора, т; g – сила всемирного тяготения, м/с²; $m_6 = V\rho$ – масса воды, т; V – объем воды, м³; ρ – плотность воды, кг/м³.

С пересчетом на момент сопротивления $M_3 = \frac{F_3 v_n}{\omega_0 \eta k_n}$, где v_n – скорость подъема, м/с; ω_0 – угловая скорость двигателя, 1/с; η – КПД электропривода; k_n – коэффициент передачи кинематической цепи технологического механизма, который должен преодолеть электропривод механизма подъема, составляющий $M_3 = 1,6 M_k$.

При установке затвора в карман плотины (рис. 4,а) между секциями, по бокам и на основание затвора крепится резина, выполняющая роль уплотнителя (рис. 4,б).

При длительной эксплуатации изменяются физико-химические свойства резины, она теряет свою эластичность. Неподвижная масса m_3 технологического механизма характеризуется силами трения покоя между взаимно неподвижными элементами электромеханической системы, а именно: рабочей среды (основание опоры), рабочего органа (вес груза) и сил взаимосвязи между ними, которые формируются от конструктивных особенностей рабочей среды. Основание опоры может представлять собой разного вида металлоблочные конструкции, в которых или на которых находится груз.

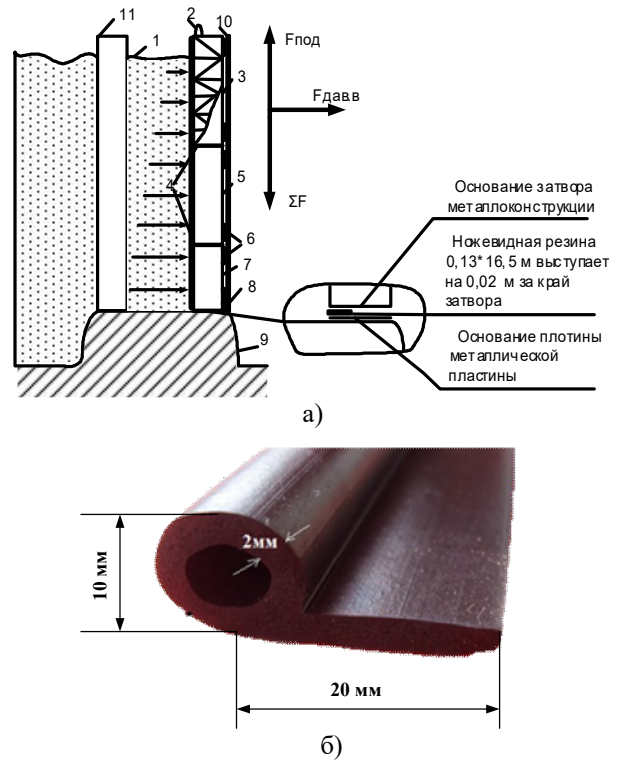


Рисунок 4 – Технологический объект в рабочем состоянии:

а) вид секции сливной плотины в разрезе;

б) внешний вид уплотнительной резины:

1 – вода; 2 – петли для строповки; 3 – первая секция затвора; 4 – уплотнительная резина;

5 – вторая секция затвора; 6 – колеса для движения затвора по направляющим; 7 – третья секция;

8 – ножевидная резина; 9 – основание сливной плотины; 10 – направляющие рабочих карманов;

11 – аварийный затвор

Если затвор находится на плоском основании без опор длительное время, то между основанием затвора и основанием кармана, по теории поверхностных сил, происходит притяжение макрообъектов (работа адгезивных сил), адгезию (прилипание двух тел друг к другу) можно охарактеризовать термо-динамической величиной работы, которую надо совершить для разделения в равновесных условиях двух приведенных в контакт разнородных тел [20]. Силы сцепления двух тел обусловлены действием молекулярных сил и определяются по выражению

$$F(h) = g_i V(h), \quad (2)$$

где $V(h)$ – удельная энергия взаимодействия параллельных друг другу плоских межфазных границ, разделенных тем же зазором шириной h ; g_i – фактор формы, зависящий от радиуса кривизны поверхностей [20].

Если существует прослойка между твердыми поверхностями (следствие погодных условий, условий эксплуатации и т.д.), то усилия формируются от сил взаимодействия веществ и особенно от геометриче-

ских размеров рабочих поверхностей. Плотность диффузионного потока между основанием затвора и резиной и между основанием кармана и основанием затвора может быть рассчитана по выражению (2), в котором коэффициенты определяются как средние за время эксплуатации [20, 21].

При выполнении трогания происходит разрушение адгезивных соединений резины с основанием затвора и кармана плотины (рис. 5).

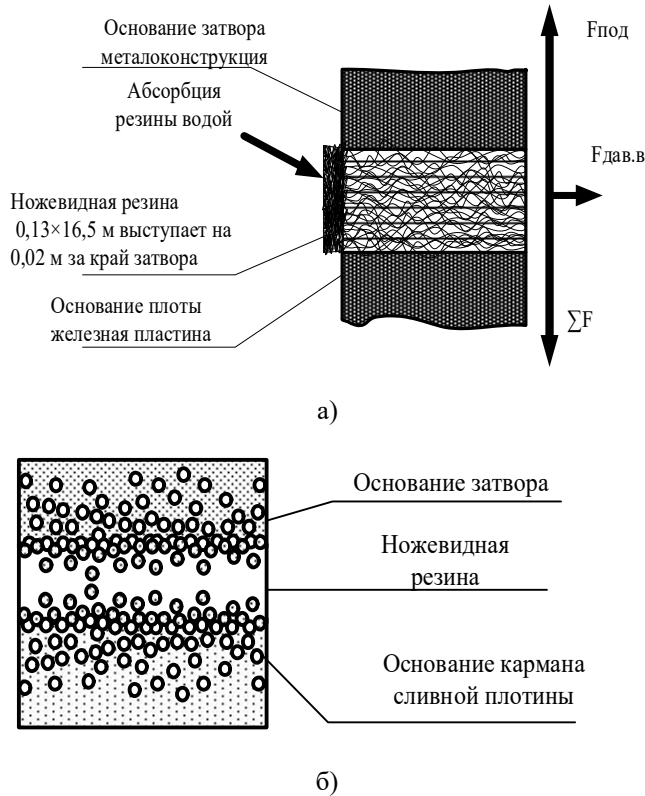
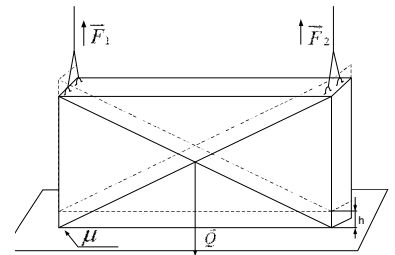


Рисунок 5 – Изменение физико-химических свойств резины: а) явление диффузии в металлополимерных трибосопрояжениях; б) резина в разрезе в рабочем состоянии при истечении времени работы и силы, возникающие в начальной фазе трогания

Разрушение адгезивного слоя, а именно «отрыв» основания груза с поверхности основания может быть выполнено двумя методами:

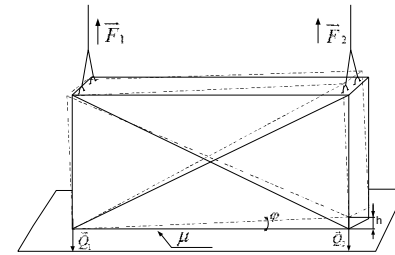
- одновременным отрывом по всей площади контакта одной части адгезивного соединения от другой (рис. 6,а);
- постепенным расслаиванием адгезивного соединения (рис. 6,б).

В первом случае разрушающая нагрузка может прилагаться в направлении, перпендикулярном к плоскости контакта поверхностей. Усилие, необходимое при одновременном отрыве по всей площади контакта адгезивного соединения, значительно больше, чем усилие, формируемое при постепенном разрушении контакта (расслаивании) [20, 21].



$$\bar{F}_1 = \bar{F}_2 = \frac{mg}{2} + F(\mu)$$

а)



б)

$$\bar{F}_1 = mg \cos \phi + F(\mu); \bar{F}_2 = mg \sin \phi + F(\mu)$$

Рисунок 6 – Разрушение адгезивного слоя

Определяя максимальный момент силы, которую необходимо приложить для «отрыва» основания затвора от основания кармана, будем предполагать, что за время работы уплотнительная резина подверглась адгезии по всей рабочей площади. Момент силы определяем из соотношения сопротивления к разрыву ($F(\mu) = 6,4 \text{ Н/м}$) по всей рабочей площади ($s_{\text{раб}} = 1,44 \text{ м}^2$). Численное значение сопротивления к разрыву уменьшается в диапазоне от 50 до 80 % [12] (k) с учетом старения резины и утратой её эластичности за период эксплуатации ($k = 0,2$) [19, 20]:

$$F_{\text{м.с.}} = F_{\text{роз}}(\mu) s_{\text{раб}} k = 0,633 F_3.$$

Сила разрыва диффузных слоев между основанием кармана сливной плотины и основанием затвора $F_{\text{отр}}$ рассчитывается по (1) с учетом параметров диффундирующих поверхностей и составляет $F_{\text{отр}} = 0,28 F_3$ [20].

Также за время эксплуатации происходит засорение направляющих кармана, в котором установлен затвор. При длительной эксплуатации в местах засорения слои уплотняются под воздействием внешней среды и это приводит к увеличению усилий, необходимых для сдвига контактных поверхностей колеса и направляющих кармана. Модуль силы трения качения F_k определяют по закону:

$$F_k = \frac{K_k N}{r}, \text{ (Н)}, \quad (3)$$

где K_k – безразмерный коэффициент трения качения; N – модуль нормальной составляющей силы реакции опоры; r – радиус катящегося тела (рис. 7).

Под воздействием сил тяжести деформируются контактные поверхности подшипников в колесах затвора, что приводит к возрастанию силы трения скольжения в подшипниках, которая является одной из составляющих силы момента сопротивления при трогании затвора по направляющим кармана и при перемещении затвора по направляющим кармана является источником неравномерности моментов сопротивления сторон затвора.

Максимальное значение составляющих силы сопротивления имеют следующие расчетные значения: $F_{тр.р} = 0,2F_{м.з}$; $F_{тр.к} = 0,5F_{м.з}$; $F_{тр.с} = 0,05F_{м.з}$.

Перечисленные факторы составляют первоначальный момент сопротивления, который имеет стохастический характер и может превышать номинальный в несколько раз. В момент сопротивления при поднятия затвора с рабочего места входит:

- преодоление силы давления воды;
- сила трения в подшипниках и направляющих; в процессе эксплуатации сливной плотины засоряются и корродируют направляющие затвора;
- возрастают силы трения качения между колесами и направляющими;
- силы трения скольжения в подшипниках;
- со временем металлоконструкция обрастает ракушками и усиливает вес.

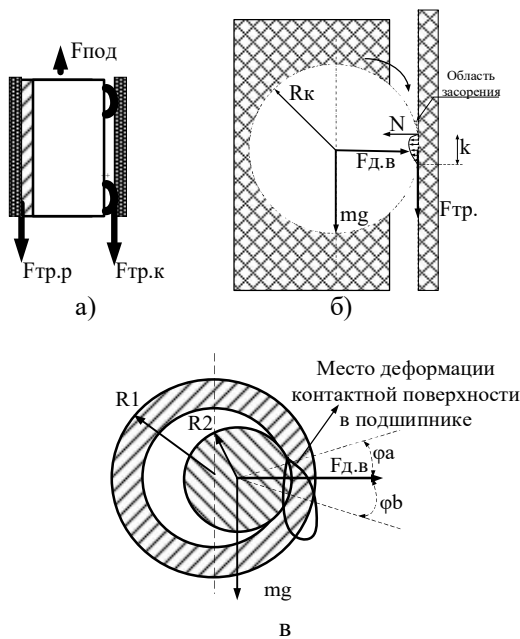


Рисунок 7 – Формирование силы трения при качении подшипника колеса затвора по направляющим:

- а) вид затвора в разрезе при движении по направляющим кармана; б) формирование силы трения при качении колеса затвора по направляющим;
- в) распределение сил в рабочем состоянии подшипника качения: $F_{под}$ – усилия подъема; $F_{тр.р}$ – усилие сопротивления резины при движении; $F_{тр.к}$ – усилие сопротивления колеса при движении; N – реакция опоры при качении; k – плечо силы трения качения; mg – масса затвора; R_k – радиус колеса; $F_{д.в}$ – усилие; R_1 – радиус корпуса подшипника; R_2 – радиус вала подшипника

Данную зависимость можно представить математическим выражением:

$$\sum F = F_m + F_{м.с.} + F_{диф} + F_{тр.р} + F_{тр.к} + F_{тр.с}, \quad (4)$$

где F_m – сила тяжести затвора и воды, действующей на затвор со стороны верхнего бьефа; $F_{м.с.}$ – сила, создаваемая разрывом межмолекулярных связей диффундирующих слоев резины с основанием затвора; $F_{диф}$ – сила разрыва диффузных слоев между основанием кармана сливной плотины и основанием затвора; $F_{тр.р}$ – сила трения грушевидной резины с направляющими кармана при подъеме затвора; $F_{тр.к}$ – сила трения качения колес; $F_{тр.с}$ – сила трения подшипников скольжения [10]. Таким образом, момент, который необходимо сформировать электроприводу механизма подъема, можно рассчитать по математической зависимости

$$M_{mp} = \frac{\sum F v_n}{\omega_o \eta k_n}.$$

На рис. 8,а,в представлены результаты математического моделирования зависимости момента сопротивления частотно-регулируемого электропривода механизма подъема при поэтапном выполнении технологической операции с учетом свойств системы «электропривод–трансмиссия механизма подъема–рабочая среда» и угловой скорости барабана лебедки. Для сравнения выполнено математическое моделирование трогания и пуска частотно-регулируемого электропривода, когда момент сопротивления учитывает только классические составляющие (рис. 8,б,г).

Как видно из графиков, момент сопротивления, прикладываемый в точке соединения неподвижного рабочего элемента и движущейся трансмиссией электропривода, может превышать номинальный в несколько раз, т.к. состоит не только из стандартных составляющих (вес груза, силы трения кинематической цепи), но и составляющих, которые зависят от эксплуатационных технологических параметров и имеют стохастический характер.

Таким образом, при выполнении трогания технологического механизма электропривод должен сформировать пусковой момент, который при необходимости должен превышать пусковой в несколько раз [24].

На базе этапов трогания и пуска, с учетом особенностей формирования момента сопротивления во время эксплуатации технологического механизма, при применении минимизации усилий разрушения адгезивных слоев рабочего органа сформулированы требования к системе двухдвигательного электропривода технологического механизма для выполнения предпусковой подготовки, трогания и перемещения затвора по направляющим кармана:

- формирование поочередного приложения достаточного момента по сторонам затвора для вы-

полнения предпусковой подготовки (разрушение адгезивных слоев рабочего органа);

– формирование кратковременного достаточного пускового момента при необходимости с перегруз-

кой по току на допустимое значение времени при предпусковой подготовке;

– формирование достаточного пускового момента при трогании механизма;

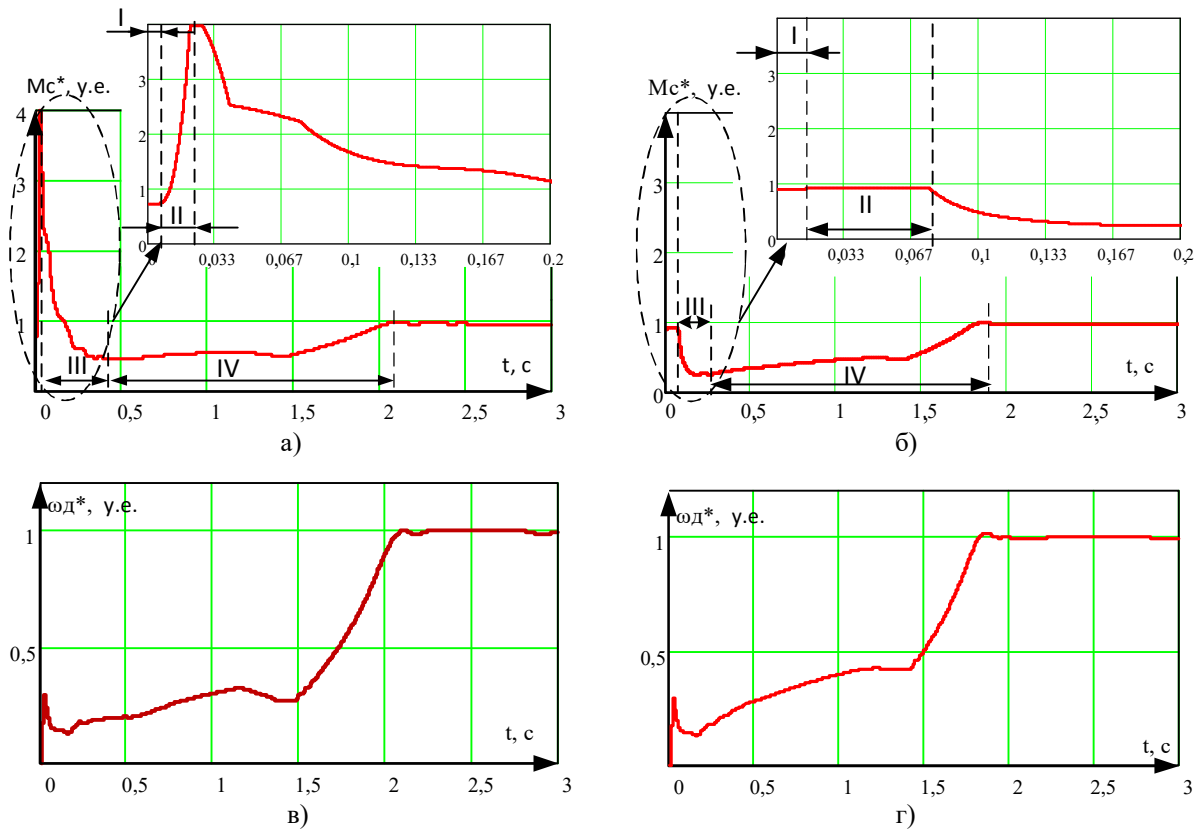


Рисунок 8 – Момент сопротивления и угловая скорость двигателя при выполнении подъема груза:

а), в) с учетом всех составляющих M_c ; б), г) классические составляющие момента M_c

I – первый этап подъема; II, III – второй этап подъема; IV – третий этап подъема

– обеспечение синхронного перемещения элементов металлоконструкции затвора по направляющим кармана;

– контроль тепловых нагрузок в режиме трогания и пуска;

– формирование режимов пуска и перемещения при подъеме;

– осуществление позиционирования при установке затвора в карман в соответствии с алгоритмом выполнения технологических операций.

ВЫВОДЫ. Анализ физических процессов, протекающих в системе «электропривод–трансмиссия механизма–рабочий орган» при выполнении трогания и пуска, показал, что, помимо традиционных составляющих, момент сопротивления при трогании дополняется еще и силами, которые формируются под воздействием режимов эксплуатации и влияния внешней среды. Силы адгезии соприкасающихся поверхностей имеют значительный вес и усиливают момент сопротивления покоя в 1,5 раза. Разрушение этих сил происходит в момент перехода технологического механизма из состояния покоя в состояние движения. С учетом всех сил, которые формируют момент сопротивления, момент двигателя в началь-

ной фазе трогания превышает критический в четыре раза, что при неуправляемом пуске сопровождается значительными токами и, как следствие, перегревом изоляции и значительными динамическими нагрузками на всей кинематике технологического механизма. Существующая система электропривода при больших нагрузках и неравномерном распределении моментов на приводные машины «электрически разрушается», что приводит к аварийным режимам работы или выходу из строя технологического механизма.

На базе анализа физико-химических процессов, происходящих в электротехническом комплексе механизма подъема сливной плотины, разработаны требования к системе управления, обеспечивающие как трогание и пуск системы, так и перемещение объекта в рабочем пространстве с возможностью снижения аварийности и увеличения энергоэффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

2. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Ключев А.С., Глазов Б.В., Будровский А.Х., Ключев А.А. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: справочное пособие / Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
4. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. – Минск: Вышэйшая школа, 1972. – 608 с.
5. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Терехов В.М. и др. Основы автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
6. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
7. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. – Харьков: Изд-во «Підручники НТУ «ХП», 2014. – 408 с.
8. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 206 с.
9. Казак С.А. Динамика мостовых кранов. – М.: Машиностроение, 1968. – 331 с.
10. Лещев В.А. Параметрическое управление гашением колебаний подвешенного на кране груза // Электротехнічні комп'ютерні системи. – К.: Техніка, 2011. – Вип. 4 (80). – С. 172–174.
11. Хребтова О.А., Гладырь А.И. Особенности трогания кранового электропривода подъема затвора сливной плотины // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск № 30 «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 2009. – 250 с.
12. Соколовский А.А., Вайнштейн Э.Ф., Ухова Е.М., Кузьминский А.С. Старение резин в напряженном состоянии. – М.: ЦНИИТЭ Нефтехимии, 1988. – С. 60–64.
13. Khrebtova O., Martsyniuk V. Assessment of expediency of modernization of the dam's shutter electric drive taking into account the longitudinal deformations of ropes // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07–08 квітня 2011 р. – Кременчук, КНУ, 2011.
14. Хребтова О.А., Сергієнко С.А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму підйому затвора зливної греблі // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – 660 с.
15. Масандилов Л.Б. Электропривод подъемных кранов: учеб. пособие. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 100 с.
16. Унгру Ф., Иордан Г. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. – Л.: Энергия, 1971. – 182 с.
17. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
18. Тимко А.И. Теоретическая механика. – Харьков: Издательство Харьковского государственного университета, 1967. – 318 с.
19. Зуев Ю.С., Дегтева Т.Г. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях. – М.: Химия, 1986.
20. Справочник химика. Химия и химическая технология // Интернет ресурс <http://chem21.info/info/932093/>
21. Хребтова О.А., Ченчевой В.В., Огарь В.А. Определение момента асинхронного двигателя при трогании // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 4/2013 (24). – 106 с.

CREATING A MOMENT OF RESISTANCE OF THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM TWIN-ENGINE ELECTRIC LIFT MECHANISM SHUTTER DAM DRAIN WHEN STARTING

O. Khrebtova, S. Serhiienko

Kremenchuk Mikhaïlo Ostrogradsky National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: 34092@ukr.net

Purpose. The purpose of this work is to determine the factors of the formation of the moment of resistance to take them into account when creating an electric drive system. **Methodology.** The paper deals with the features of the formation of forces and moments of resistance when lifting the shutter of the drain dam taking into account the operational and design features of the process equipment. **Results.** According to the above mathematical dependencies, the moment of resistance of the system "electric drive-transmission of the lifting-working mechanism" is calculated at the time of starting and starting. **Originality.** Based on the results of mathematical modeling, the time dependences are plotted at the touching taking into account the properties of the system and with the classical components of the moment of resistance. On the basis of the considered stages of starting and starting taking into account the features of the formation of the moment of resistance during the operation of the technological mechanism, using the minimization of the forces of destruction of the adhesive layers of the working element, the requirements are formulated for a system of two-motor electric drive of the technological mechanism for pre-starting preparation, starting and moving the shutter along the pocket guides. **Practical value.** Based on the analysis of the physico-chemical processes taking place in the electrical complex of the lifting dump raising mechanism, the requirements to the control system have been developed that ensure

both the start and start of the system and the movement of the object in the working space with the possibility of reducing the accident rate and increasing energy efficiency. References 21, tables 0, figures 8.

Key words: touching, resistance forces, adhesive joints.

REFERENCES

1. Sandler, A.S. and Sarbatov, R.S. (1966), *Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami* [Frequency control of asynchronous motors], Energiya, Moscow. (in Russian)
2. Eliseev, V.A. and Shiniansky, A.V. (1983), *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Handbook on the automated electric drive], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
3. Klyuyev, A.S., Glazov, B.V., Budrovsky, A.Kh. and Klyuyev, A.A. (1990), *Proyektirovaniye sistem avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov* [Designing of systems of automation of technological processes: reference manual], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
4. Geiler, L.B. (1972), *Osnovy elektroprivoda* [Fundamentals of the electric drive], Vysheyschaya shkola, Minsk. (in Russian)
5. Chilikin, M.G., Sokolov, M.M., Terekhov, V.M. et al. (1974), *Osnovy avtomatizirovannogo elektroprivoda* [Fundamentals of an automated electric drive], Energiya, Moscow. (in Russian)
6. Chorny, O.P., Gladyr, A.I., Osadchuk, Yu.G. et al. (2006), *Puskovyye sistemy nereguliruyemykh elektroprivodov: monografiya* [Start-up systems of unregulated electric drives: monograph], PE Shcherbatykh A.V., Kremenchug. (in Russian)
7. Klepikov, V.B. (2014), *Dinamika elektromekhanicheskikh sistem s nelineynym treniyem, monografiya* [Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction, monograph], Pidruchniki NTU «KhPI», Kharkov. (in Russian)
8. Komarov, M.S. (1969), *Dinamika gruzopodyemnykh mashin* [Dynamics of the hoisting machines], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
9. Kazak, S.A. (1968), *Dinamika mostovykh kranov*. [Dynamics of bridge cranes], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
10. Leshchev, V.A. (2011), "Parametric control of vibration damping of the suspended cargo on the crane" *Elektrotekhnichni kompyuterni sistemy*, Vol. 4, no. 80, pp. 172–174. (in Russian)
11. Khrebtova, O.A. and Gladyr, A.I. (2009), "Peculiarities of starting the crane electric drive of the lifting of the gate of the drain dam", *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "Kharkovskiy politekhnicheskiy institut"*, no. 30, 250 p. (in Russian)
12. Sokolovsky, A.A., Weinstein, E.F., Uhova, E.M. and Kuzminsky, A.S. (1988), *Stareniye rezin v napryazhennom sostoyanii* [Aging of rubbers in a stressed state], TsNIITE Neftekhimii, Moscow. (in Russian)
13. Khrebtova, O. and Martsyniuk, V. (2011), "Assessment of expediency of modernization of the dam's shutter electric drive taking into account the longitudinal deformations of rope" *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modelyuvannya ta optymizatsiyi, Zbirnyk naukovykh prats IX Mizhnarodnoyi nauково-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i spetsialistiv* [Electromechanical and energy systems, modeling techniques and optimization, the IX International conference of students and young researchers in Kremenchuk 14–15 April 2011].
14. Khrebtova, O.A. and Serhienko, S.A. (2012), "Studying the properties of the system electric winders shutter drainage dam", *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. Tematychnyy vypusk "Problemy avtomatyzovanoho elektroprivoda. Teoriya i praktyka" nauково-vyrobnychoho zhurnalu*, Vol. 3, no. 19, 660 p. (in Ukrainian)
15. Masandilov, L.B. (1998), *Elektroprivod podzemnykh kranov, uchebnoye posobiye* [Electric drive of cranes: a manual], Izdatelstvo MEI, Moscow. (in Russian)
16. Ungru, F. and Jordan, G. (1971), *Sistemy soglasovannogo vrashcheniya asinkhronnykh elektrodvigatelye* [Systems of coordinated rotation of induction motors], Energiya, Leningrad. (in Russian)
17. Voronkov, B.D. (1979), *Podshipniki sukhogo treniya* [Bearings of dry friction], Mashinostroyeniye, Moscow. (in Russian)
18. Timko, A.I. (1967), *Teoreticheskaya mekhanika* [Theoretical mechanics], Izdatelstvo Kharkovskogo gosudarstvennogo universiteta, Kharkov. (in Russian)
19. Zuev, Yu.S. and Degteva, T.G. (1986), *Stoykost elastomerov v ekspluatatsionnykh usloviyakh* [Stability of elastomers under operating conditions], Khimiya, Moscow. (in Russian)
20. *Spravochnik khimika. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Handbook of the chemist. Chemistry and Chemical Technology], Available at <http://chem21.info/info/932093/> (in Russian)
21. Khrebtova, O.A., Chenchevoy, V.V. and Ogar, V.A. (2013), "Determination of the moment of an asynchronous motor at the touching" *Elektromekhanichni i energozberigayuchi systemy, shcho-kvartalniy nauково-virobnichiy zhurnal*, Vol. 4, no. 24, 106 p. (in Russian)

Стаття надійшла 16.03.2017.