

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.873

*ОРЛОВ ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
orlov_yuryi@mail.ru*

*ОРЛОВ ДЕНИС ЮРЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
orlovdenis@inbox.ru*

*СТОЛЯРОВ ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
zedr@mail2000.ru*

*КАХИЕВ РУСЛАН НАРИМАНОВИЧ, ассистент,
matiz-13@rambler.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТОРМОЗОВ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Тормоза относятся к наиболее ответственным узлам грузоподъемных машин, определяющим надежность и безопасность эксплуатации. В процессе эксплуатации величина тормозного момента может измениться, что может привести к аварийной ситуации. Статья посвящена разработке способов автоматического контроля величины тормозного момента и их использованию в системах безопасности подъемных сооружений. Рассмотрены способы определения тормозного момента механизмов подъема с электрическим приводом и возможности их реализации в системах защиты грузоподъемных машин от опасных эксплуатационных воздействий для исключения аварийных ситуаций, связанных с неисправностями тормозных устройств.

Ключевые слова: грузоподъемная машина; механизм подъема; тормозной момент; диагностика тормоза; система безопасности; тормоз.

YURIY A. ORLOV, PhD, A/Professor,

orlov_yuryi@mail.ru

DENIS YU. ORLOV, PhD, A/Professor,

orlovdenis@inbox.ru

DMITRY P. STOLYAROV, PhD, A/Professor,

zedr@mail2000.ru

RUSLAN N. KAKHIEV, Assistant Lecturer,

matiz-13@rambler.ru

Tomsk State University of Architecture and Building,

2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

BRAKES STATE CONTROL METHODS IN LIFTING MECHANISMS

Brakes are the most responsible assemblies in lifting machines that determine the reliability and safety of operation. During their operation, the drag torque value changes that leads to emergency situations. This paper is devoted to the development of automated control methods for the drag torque and their use in safety systems of lift devices. The methods of detecting the drag torque of lift devices with electric drive are considered in this paper. The implementation of these methods in safety systems will protect them from emergency situations connected with malfunction of brake systems.

Keywords: lift device; lifting mechanism; drag torque; brake diagnostics; safety system; brake.

Стационарно установленный механизм для подъема и опускания грузов, иначе называемый грузоподъемным механизмом, является неотъемлемой частью практически всех грузоподъемных машин [1]. Механизм подъема груза электрического крана (рис. 1), как правило, содержит редуктор, тормоз, приводной электродвигатель, барабан, полиспаст и подвеску крюковую.

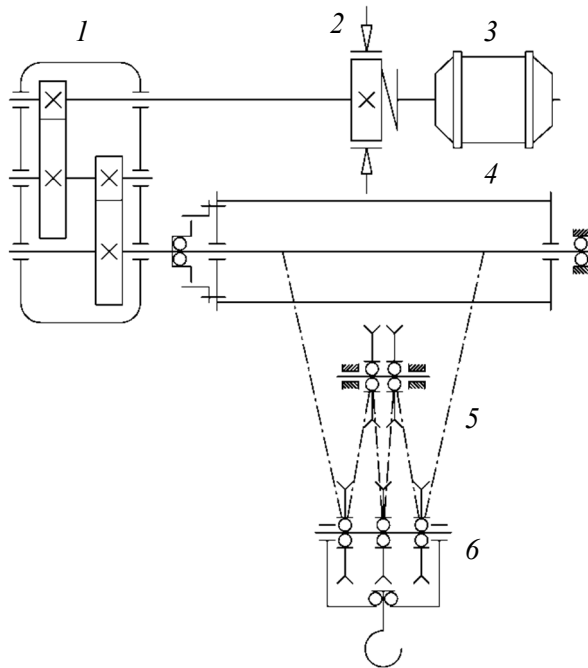


Рис. 1. Кинематическая схема механизма подъема груза:

1 – редуктор; 2 – тормоз; 3 – приводной электродвигатель; 4 – барабан; 5 – полиспаст; 6 – подвеска крюковая

Тормоза относятся к наиболее ответственным узлам грузоподъемных машин (ГПМ), определяющим надежность и безопасность эксплуатации. Тормоз механизма подъема ГПМ предназначен для остановки и удержания груза в подвешенном состоянии с заданным коэффициентом запаса торможения [2]. Ненормальная работа или отказ тормоза может привести к несчаст-

ным случаям. Величина тормозного момента M_T рассчитывается таким образом, чтобы груз в любых условиях надежно затормаживался и удерживался в подвешенном состоянии. Для этого тормозной момент должен всегда превышать статический, создаваемый наибольшей нагрузкой на тормозном валу, на величину, называемую коэффициентом запаса торможения [3]. Коэффициент запаса торможения регламентируется нормативными документами и зависит от конструкции механизма и режима его работы. Для механизмов подъема груза коэффициент запаса торможения принимается не менее 1,5 [4].

В процессе эксплуатации величина тормозного момента может измениться из-за износа тормозных накладок, попадания масла или воды на тормозной шкив, поломки элементов тормоза и др. Приведение в соответствие требуемым значениям коэффициента запаса торможения осуществляется регулированием тормоза при проведении технических обслуживаний. При регулировании тормоза соблюдают такую последовательность:

- устанавливают нормальный ход якоря электромагнита или штока электрогидравлического толкателя (в зависимости от типа привода тормоза);
- регулируют величину и равномерность отхода колодок от шкива;
- устанавливают необходимую длину замыкающей пружины.

Величину тормозного момента регулируют установочной длиной замыкающей пружины при заторможенных колодках тормоза, следуя рекомендациям завода-изготовителя. При отсутствии сведений о длине замыкающей пружины тормоз регулируют по величине выбега механизма при максимальном грузе на грузозахватном органе. При этом должна обеспечиваться плавная (без рывков) остановка груза.

Величина фактического тормозного момента зависит от настройки тормоза, а в процессе эксплуатации субъективно контролируется машинистом крана. Не стоит исключать возможность неправильной настройки и диагностики тормоза, например, из-за низкой квалификации или невнимательного отношения к своим обязанностям обслуживающего персонала.

Исходя из вышесказанного, актуальным представляется разработка способов автоматического контроля величины тормозного момента и их использование в комплексных микропроцессорных системах безопасности подъемных сооружений для исключения аварийных ситуаций, связанных с неисправностями тормозных устройств [5].

Разработка способов контроля состояния тормоза потребовала исследования динамических режимов работы механизма подъема при его включении и отключении, т. к. в установившихся режимах при подъеме или опускании груза тормоз разомкнут и не создает тормозного момента.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований выявлено несколько зависимостей, характеризующих величину тормозного момента. В рамках настоящей статьи идет речь о следующих способах определения тормозного момента:

- по времени затормаживания механизма;
- по энергии, потребляемой приводным электродвигателем при пуске механизма;
- по скорости разгона механизма;

– по изменению в процессе эксплуатации разности мощностей, потребляемых из сети приводным двигателем при холостом ходе и при кратковременном замыкании тормоза.

Определение тормозного момента по времени затормаживания механизма

На рис. 2 представлены временные зависимости частоты вращения ротора n_2 , тока i_A и фазного напряжения u_A в цепи одной из фаз статорной обмотки приводного электродвигателя при остановке механизма подъема. Время затормаживания $t_{3М}$ отсчитывалось с момента отключения приводного электродвигателя t_1 до момента его остановки t_2 .

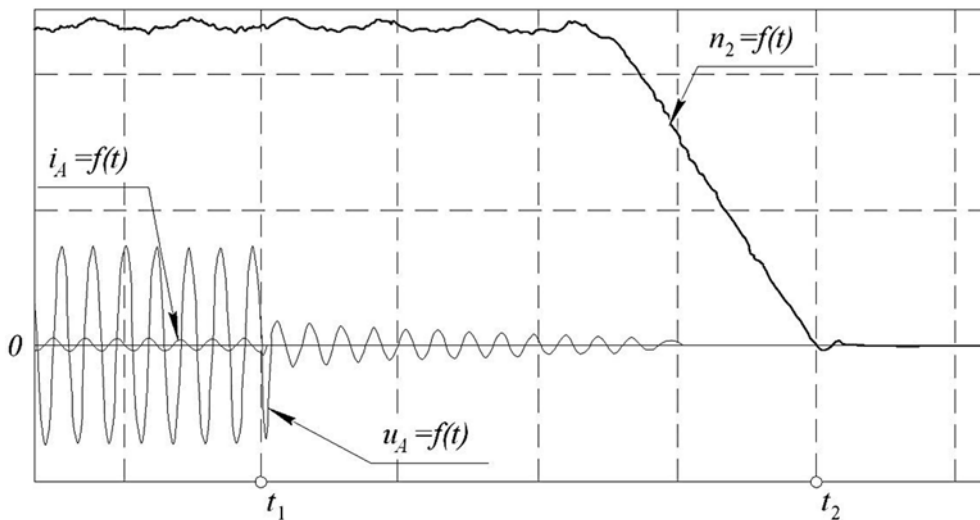


Рис. 2. Остановка механизма подъема

Для построения зависимости времени затормаживания от величины тормозного момента $t_{3М} = f(M_T)$ (рис. 6) были проведены экспериментальные исследования на натурном образце мостового крана. Эксперимент заключался в измерении времени затормаживания механизма $t_{3М}$ при опускании без груза подвески крюковой и разных значениях тормозного момента M_T . В результате аппроксимации некоторого количества точек экспериментальных данных построена зависимость $t_{3М} = f(M_T)$ (рис. 6).

С целью практической реализации данного способа зависимость $t_{3М} = f(M_T)$ можно сохранить в памяти микропроцессорного устройства для последующего определения величины тормозного момента по построенной зависимости и фактическому времени затормаживания.

Определение тормозного момента по энергии, потребляемой приводным электродвигателем при пуске механизма

Энергетический анализ процессов, протекающих при разгоне двигателя, показал, что от величины тормозного момента зависит активная мощность P_1 , потребляемая электродвигателем из сети.

Путём математического моделирования были получены зависимости мощностей, затрачиваемых в механизме подъема на совершение полезной работы и покрытие потерь (рис. 3). Мощность P_1 можно представить в следующем виде:

$$P_1 = N_{ГР} + N_{ИН} + N_T + P_{ПД} + N_{ПМ}, \quad (1)$$

где $N_{ГР}$ – мощность, затрачиваемая на поднятие груза; $N_{ИН}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление момента инерции при пуске приводного двигателя механизма подъёма; N_T – мощность, затрачиваемая на преодоление тормозного момента; $P_{ПД}$ – мощность, затрачиваемая на покрытие электрических потерь в электродвигателе; $N_{ПМ}$ – мощность, затрачиваемая на покрытие потерь в механизме подъема.

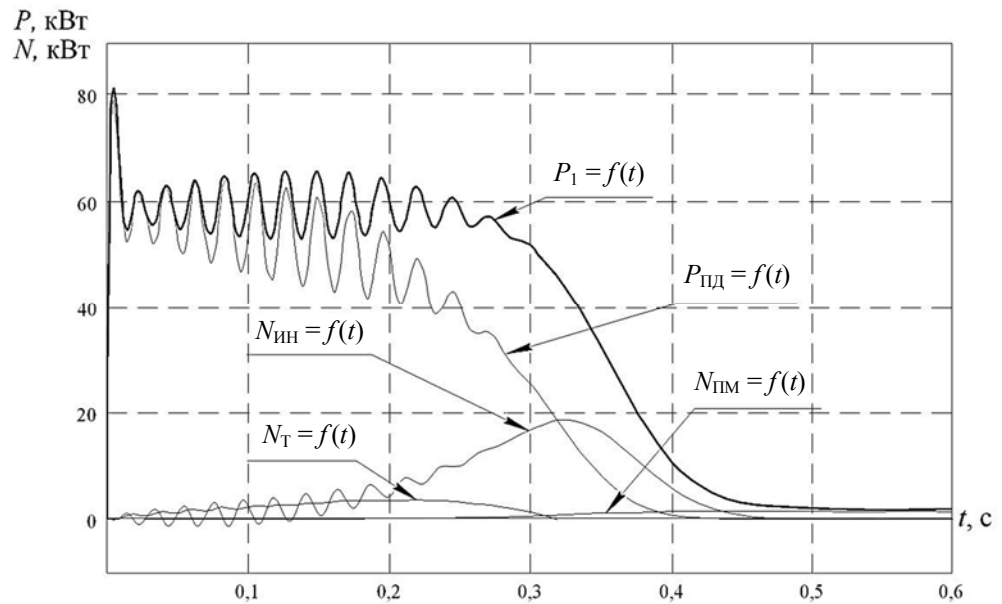


Рис. 3. Распределение мощностей при опускании подвески крюковой без груза

Площади под кривыми, представленными на рис. 3, соответствуют затраченным работам. Интегрируя обе части уравнения (1), получим

$$\int P_1 dt = \int (N_{ГР} + N_{ИН} + N_T + P_{ПД} + N_{ПМ}) dt,$$

$$W_1 = A_{ГР} + A_{ИН} + A_T + W_{ПД} + A_{ПМ},$$

где W_1 – электрическая энергия, потребляемая электродвигателем из питающей сети; $A_{ГР}$ – работа, затраченная на поднятие груза (механическая работа); $A_{ИН}$ – работа, затраченная на преодоление момента инерции при пуске двигателя; A_T – работа, затраченная на преодоление тормозного момента; $W_{ПД}$ – энергия, затраченная на покрытие потерь в электродвигателе; $A_{ПМ}$ – работа, затраченная на покрытие потерь в механизме подъема.

Определение тормозного момента возможно путём вычисления работы A_T , но техническая реализация алгоритма выделения этой работы из общего значения потребляемой энергии двигателем W_1 затруднительна. Решить эту проблему можно, измеряя W_1 при опускании подвески крюковой без груза. В этом случае составляющие величины потребляемой электрической энергии ($A_{ГР}$, $A_{ИН}$, $W_{ПД}$, $A_{ПМ}$) практически неизменны, а величина W_1 пропорциональна изменению работы A_T . Другими словами, величина W_1 при опускании подвески крюковой без груза пропорциональна величине тормозного момента M_T .

Для определения величины тормозного момента M_T по энергии, потребляемой приводным электродвигателем W_1 , необходимо в памяти микропроцессорного устройства сохранить следующую зависимость: $\Delta W_1 = f(M_T)$ (рис. 6). В указанной зависимости ΔW_1 определяется по следующему выражению:

$$\Delta W_1 = W_1^{\text{НОМ}} - W_1 = \int_{t_0}^{t_y} (P_1^{\text{НОМ}} - P_1) dt = \int_{t_0}^{t_y} \Delta P_1 dt,$$

где $W_1^{\text{НОМ}}$, $P_1^{\text{НОМ}}$ – энергия и мощность, потребляемые двигателем при тормозном моменте, настроенном на номинальное значение; W_1 , P_1 – энергия и мощность, потребляемые двигателем при фактическом (как правило, отличном от номинального) тормозном моменте; t_0 – время пуска приводного электродвигателя; t_y – время окончания электромеханических переходных процессов.

На рис. 4 представлены экспериментальные $P_1^{\text{НОМ}} = f(t)$, $P_1 = f(t)$ и расчетные $\Delta P_1 = f(t)$, $W_1^{\text{НОМ}} = f(t)$, $W_1 = f(t)$, $\Delta W_1 = f(t)$ зависимости.

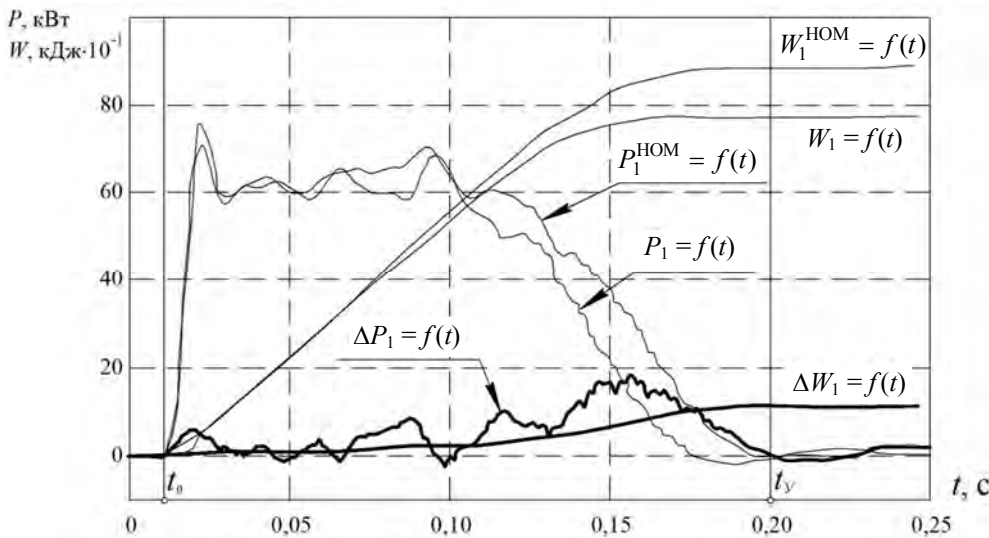


Рис. 4. Энергетический анализ процессов разгона приводного электродвигателя

Отклонение тормозного момента от номинального значения будет пропорционально величине ΔW_1 , значение которой равно площади под кривой $\Delta P = f(t)$ (рис. 4).

Определение тормозного момента по скорости разгона механизма

Величина тормозного момента M_T оказывает влияние на скорость разгона приводного электродвигателя. Анализируя зависимости $n_2^{\text{НОМ}} = f(t)$, полученные при номинальном тормозном моменте, и $n_2 = f(t)$, полученные при тормозном моменте, отличном от номинального (рис. 5), можно сделать вывод, что величина тормозного момента M_T пропорциональна значению $\Delta n_{2\text{max}}$ (где $\Delta n_2 = n_2 - n_2^{\text{НОМ}}$).

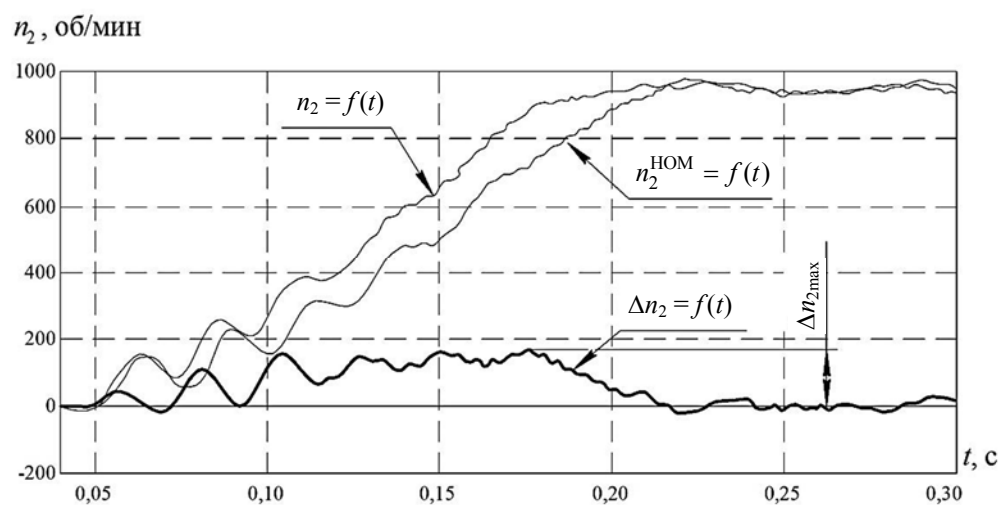


Рис. 5. Определение величины $\Delta n_{2\text{max}}$

Определив значения $\Delta n_{2\text{max}}$ для нескольких различных значений тормозного момента, можно построить зависимость $\Delta n_{2\text{max}} = f(M_T)$.

Зависимости $t_{3\text{М}} = f(M_T)$, $W_1 = f(M_T)$ и $\Delta n_{2\text{max}} = f(M_T)$, полученные в ходе экспериментальных исследований на натурном образце мостового крана (тормоз механизма подъема автоматический нормально-замкнутый колодочный ТКГ-300 с приводом от электрогидравлического толкателя), представлены на рис. 6. Точка $M_T^{\text{НОМ}}$ на рис. 6 соответствует номинальному значению тормозного момента.

Вышеперечисленные способы определения величины тормозного момента с целью практической реализации предполагают формирование в памяти микропроцессорного прибора линеаризованной зависимости $t_{3\text{М}} = f(M_T)$, $W_1 = f(M_T)$ или $\Delta n_{2\text{max}} = f(M_T)$ (в зависимости от выбранного способа). Так

как указанные зависимости близки к линейным, то их формирование возможно производить по двум точкам:

- 1) при тормозе, настроенном на номинальное значение ($M_T = M_T^{\text{НОМ}}$);
- 2) при разомкнутом состоянии тормоза ($M_T = 0$).

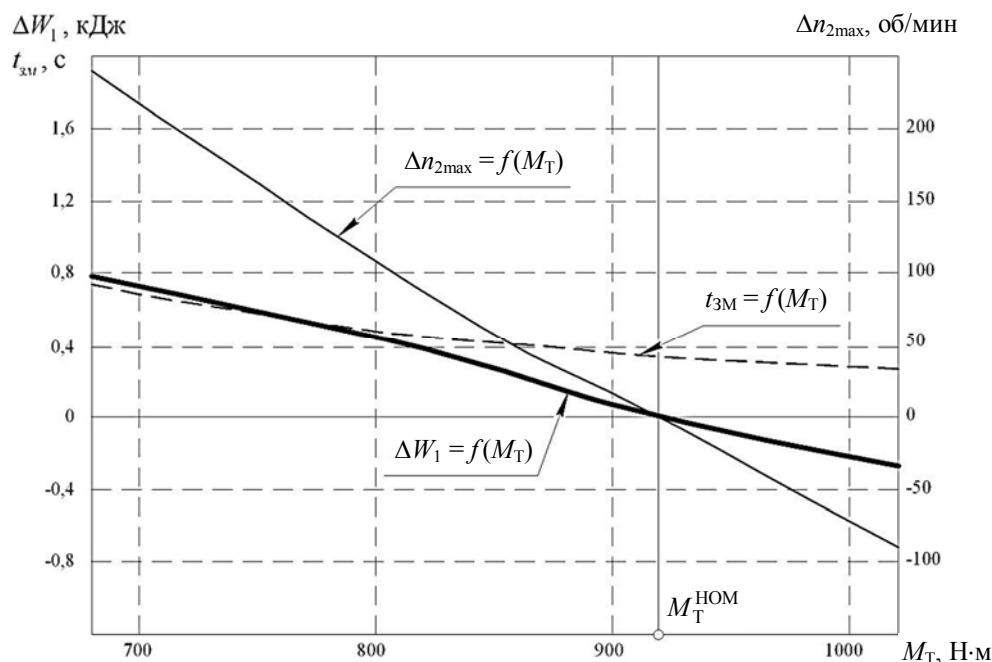


Рис. 6. Зависимости величин t_{3AM} , ΔW_1 и Δn_{2max} в функции тормозного момента

Измерение величины (контроль) тормозного момента целесообразно проводить при опускании подвески крюковой без груза. Алгоритм работы прибора может предусматривать ограничение рабочих движений при достижении величиной тормозного момента предварительно установленных пороговых значений, которые могут быть как больше, так и меньше $M_T^{\text{НОМ}}$.

**Определение тормозного момента
по изменению в процессе эксплуатации разности мощностей,
потребляемых из сети приводным двигателем при холостом ходе
и при кратковременном замыкании тормоза**

Активная мощность P_1 , потребляемая электродвигателем из сети, зависит от момента сопротивления приведенного к валу двигателя. В связи с этим существует возможность оценивать значение тормозного момента грузоподъемной лебедки с электроприводом по активной потребляемой мощности P_1 при кратковременном замыкании тормоза [6]. При этом возможно реализовать наиболее простой алгоритм оценки работоспособности лебедки в реальном времени на микропроцессоре с ограниченными вычислительными ресурсами.

Суть способа заключается в измерении в трех характерных точках t_1 , t_2 и t_3 соответствующих значений потребляемой активной мощности P_1^1 , P_1^2 и P_1^3 (рис. 7) и сравнении этих значений между собой [7, 8].

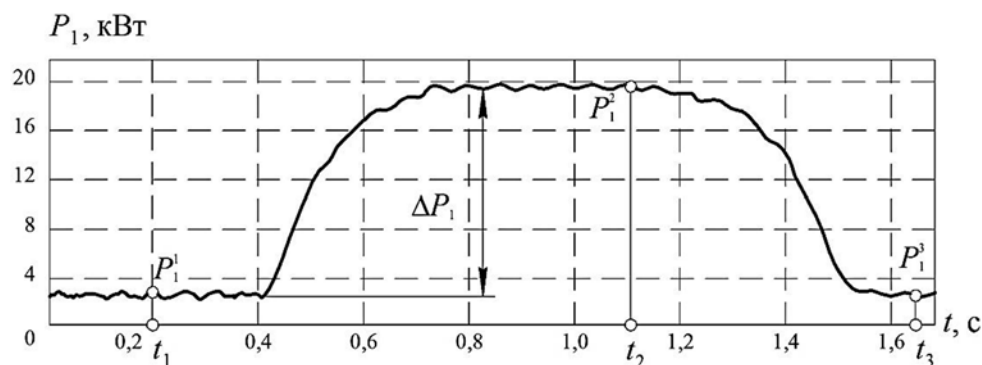


Рис. 7. Осциллограмма потребляемой активной мощности P_1 при работе механизма подъема и кратковременном замыкании тормоза

Точка t_1 соответствует моменту подачи сигнала на замыкание тормоза во время работы привода, t_2 соответствует работе механизма при замкнутом тормозе, а момент времени t_3 соответствует работе привода после размыкания тормоза.

Тормозной момент пропорционален величине ΔP_1 , определяемой выражением

$$\Delta P_1 = P_1^2 - P_1^1.$$

В процессе эксплуатации отклонение M_T от номинального значения будет определяться отношением $\Delta P_1^{\text{НОМ}} / \Delta P_1$, где $\Delta P_1^{\text{НОМ}}$ – величина, определенная при номинальном тормозном моменте и сохраненная в памяти прибора. Чрезмерное отклонение M_T от номинального значения, а также существенное различие величин P_1^2 и P_1^3 свидетельствуют о неисправности тормоза.

Рассмотренные способы контроля работоспособности тормозных устройств рекомендованы для использования в комплексных системах безопасности грузоподъемных машин [9, 10] и направлены на повышение уровня безопасности и эксплуатационной надёжности грузоподъёмной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 552 с.
2. Александров, М.П. Тормозные устройства : справочник / М.П. Александров, А.Г. Лысяков, М.В. Новожилов ; под общ. ред. М.П. Александрова. – М. : Машиностроение, 1985. – 312 с.

3. Бортяков, Д.Е. Специальные грузоподъемные машины. Лебедки / Д.Е. Бортяков, А.Н. Орлов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 64 с.
4. Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов : сб. документов. Серия 10. Вып. 7 / колл. авт. – 2-е изд., испр. – М. : Научно-технический центр «Промышленная безопасность», 2009. – 288 с.
5. Сушинский, В.А. Применение и перспективы развития приборов и систем безопасности грузоподъемных кранов / В.А. Сушинский // Подъемно-транспортное дело. – 2004. – № 4. – С. 7–11.
6. Оценка тормозного момента на основе потребляемой активной мощности приводного электродвигателя грузоподъемной лебедки / Ю.А. Орлов [и др.] // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VI Международной научно-технической конференции, 9–11 октября 2013 г., Томск / Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) ; Томская область, администрация ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – С. 250–252.
7. Способ контроля состояния тормоза лебедки с электроприводом / Ю.А. Орлов, Д.П. Столяров, Д.Ю. Орлов, Р.Н. Кахиев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 2. – С. 357–362.
8. Пат. 2455223. Российская федерация, МПК (2006.01) B66D5/00. Способ контроля тормозного устройства механизма подъема с электроприводом / Орлов Ю.А., Орлов Д.Ю., Столяров Д.П., Кахиев Р.Н. – № 2011101046/11 ; заявл. 12.01.11 ; опубл. 10.07.12, Бюл. № 19. – 10 с.
9. Энергетический мониторинг электроприводов как средство повышения надёжности и безопасности эксплуатации подъёмных сооружений / Ю.А. Орлов, Д.Ю. Орлов, Д.П. Столяров, Р.Н. Кахиев // Современные тенденции в науке и образовании : сб. научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 3 марта 2014 г. : в 6 ч. Часть III. – М. : АР-Консалт, 2014. – С. 103–105.
10. Кахиев, Р.Н. Энергетический мониторинг электрических грузоподъемных лебедок как метод определения нагрузок и оценки их технического состояния / Р.Н. Кахиев, Д.П. Столяров, Д.Ю. Орлов // Перспективы развития фундаментальных наук : труды XI Международной конференции студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 22–25 апреля 2014 г. / под ред. Е.А. Вайтулевич. – Электрон. дан. – Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2014. – Условия доступа : http://science-persp.tpu.ru/Previous%20Materials/Konf_2014.pdf, свободный. – С. 772–774.

REFERENCES

1. Aleksandrov M.P. Gruzopod'emnye mashiny [Lifting machines]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2000. 552 p. (rus)
2. Aleksandrov M.P., Lysyakov A.G., Novozhilov M.P. Spravochnik. Tormoznye ustroystva [Braking device manual]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985. 312 p. (rus)
3. Bortyakov D.E., Orlov A.N. Spetsial'nye gruzopod'emnye mashiny. Lebedki [Special lifting machines. Winches]. St.-Petersburg: Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University Publ., 2005. 64 p. (rus)
4. Promyshlennaya bezopasnost' pri ekspluatatsii gruzopod'emnykh kranov: Sbornik dokumentov. Seriya 10. Vypusk 7 [Industrial safety in crane operation. Collection of documents. Series 10. Issue 7]. Moscow: Nauchno-tekhnikeskii tsentr 'Promyshlennaya bezopasnost'', 2009. 288 p. (rus)
5. Sushinskii V.A. Primenenie i perspektivy razvitiya priborov i sistem bezopasnosti gruzopod'emnykh kranov [Application and prospects of development of safety devices and systems of cranes]. *Lift and Transportation Engineering*. 2004. No. 4. Pp. 7–11. (rus)
6. Orlov Yu.A., Bukreev V.G., Orlov D.Yu., Syolyarov D.P., Kakhiev R.N. Otsenka tormoznogo momenta na osnove potreblyaemoi aktivnoi moshchnosti privodnogo elektrodvigatelya gruzopod'emnoi lebedki [Drag torque estimated by consumed power of winch drive motor]. *Proc. 6th Sci. Conf. 'Energy Electromechanical Transducers'*. Tomsk: TPU Publ., 2013. Pp. 250–252. (rus)

7. Orlov Yu.A., Stolyarov D.P., Orlov D.Yu., Kakhiev R.N. Sposob kontrolya sostoyaniya tormoza lebedki s elektroprivodom [Brake state monitoring of winch]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011. No. 2. Pp. 357–362. (rus)
8. Orlov Yu.A., Orlov D.J., Stoljarov D.P., Kakhiev R.N. Sposob kontrolya tormoznogo ustroystva mekhanizma pod"ema s elektroprivodom [Brake control method for electrically driven lifting mechanism]. Pat. Rus. Fed. N 2455223. IPC B66D5/00. Publ. 10.07.12, Bul. No. 19. 10 p. (rus)
9. Orlov Yu.A., Orlov D.Yu., Stolyarov D.P., Kakhiev R.N. Energeticheskii monitoring elektroprivodov kak sredstvo povysheniya nadezhnosti i bezopasnosti ekspluatatsii pod"emnykh sooruzhenii [Energy monitoring of electric drives as a means of improving the reliability and safety of lifting device operation]. *Proc. Sci. Conf. 'Modern Tendencies in Science and Education'*. Pt. 3. Moscow: AR-Konsalt, 2014. Pp. 103–105. (rus)
10. Kakhiev R.N., Stolyarov D.P., Orlov D.Yu. Energeticheskii monitoring elektricheskikh gruzo-pod"emnykh lebedok, kak metod opredeleniya nagruzok i otsenki ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [Energy monitoring of electric hoisting winches as method of their load detection]. *Proc. 11th Int. Conf. of Students and Young Scientists 'Prospects of Fundamental Sciences Development'*. Tomsk, 22–25 April 2014. Pp. 772–774. (rus)