

УДК 621.86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ЧАСТОТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Гончаров К.А., Денисов И.А.

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

Рассмотрено влияние настройки системы управления на уровень динамических нагрузок, действующих на элементы грузоподъемных машин в период неустановившегося движения. Экспериментально показано влияние режима работы обобщенного механизма грузоподъемной машины на стабильность работы и изменение эксплуатационных характеристик системы управления механизмом с электрическим приводом и частотным преобразователем. Описана методика проведения эксперимента, приведены сравнительные результаты изменения эксплуатационных параметров механизма при работе как с применением системы управления с частотным преобразователем и тормозным резистором, так и без неё при работе на естественных механических характеристиках. Сделаны выводы об адекватности методики выбора динамических коэффициентов, определяющих нагруженность металлоконструкций грузоподъемных машин, представленной в нормативных документах, в случае ошибок в настройке систем управления с частотным преобразователем.

Ключевые слова: привод, система управления, частотный преобразователь, тормозной резистор, грузовая тележка, режим работы механизма, грузоподъемная машина.

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-31-39

В процессе работы металлические конструкции и элементы механизмов грузоподъемных машин испытывают воздействие динамических нагрузок различной природы и интенсивности. При перемещении грузов кранами мостового типа нагрузки, воспринимаемые механизмами грузовой тележки, в первую очередь воздействуют на металлоконструкцию рамы, формируя характерную для каждой конкретной компоновки тележки схему распределения внешних действующих усилий. Для составления адекватной расчётной схемы металлоконструкции тележки помимо координат точек передачи усилий нужно иметь точную информацию о следующих факторах:

1) механических свойствах материалов, применяемых при изготовлении элементов металлоконструкции;

2) геометрических параметрах элементов металлоконструкции;

3) уровне нагруженности элементов металлоконструкции машины в зависимости от особенностей работы расположенных на ней механизмов, а также о распределении усилий между характерными точками передачи их действия от механизмов к элементам металлоконструкции.

При проектировании грузовых тележек кранов на основе универсальной компоновочной схемы их металлоконструкции [2] значения нагрузок в различных точках ока-

зывают непосредственное влияние на расположение и итоговые геометрические параметры несущих и дополнительных усиливающих элементов металлоконструкции, обеспечивающих местную жёсткость и прочность. Данное обстоятельство справедливо как для цельносварных тележек [3], так и для тележек, выполненных по модульному принципу [1]. При этом в современной краностроении существенную роль играют критерии компактности и качества работы механизмов кранов. Данное обстоятельство выражается в широком распространении дистанционного управления механизмами крана, применении модульных технологий компоновки механизмов, а также систем управления на основе частотных преобразователей, при правильной настройке снижающих уровень возможных динамических нагрузок на элементы металлоконструкций кранов.

В ходе проведения проектных и проверочных расчётов металлоконструкций грузоподъемных машин учет динамических нагрузок производится при решении данной задачи в квазистатической постановке (динамические нагрузки учитываются как дополнительные инерционные добавки к основной эксплуатационной нагрузке и определяются количественно как их доля с помощью коэффициентов динамичности [4]). В частности, последовательность расчёта и вы-

бора коэффициентов динамичности, рекомендуемых к использованию при расчёте грузоподъёмных машин, приведена в ГОСТ 32579.1-2013 «Краны грузоподъёмные. Принципы формирования расчётных нагрузок и комбинаций нагрузок».

Важными факторами, определяющими величину динамических нагрузок, а следовательно, и значение коэффициента динамичности, являются тип привода и системы управления приводом. Однако, теоретически динамическая наружность привода и грузоподъёмной машины в целом при прочих равных условиях (режиме работы, продолжительности включения) определяется настройками системы управления. В настоящее время в грузоподъёмных машинах распространены следующие типы электроприводов [5]:

1) электропривод с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем и релейно-контакторным управлением;

2) электропривод с асинхронным электродвигателем с фазным ротором и управлением от силового контроллера;

3) электропривод с асинхронным двигателем с фазным ротором и управлением от низковольтных комплектных устройств;

4) электропривод с асинхронным короткозамкнутым двигателем и управлением от преобразователя частоты.

Механические характеристики двух последних приводов наиболее близки к оптимальным, обладающим необходимой жёсткостью. При этом система управления с применением преобразователя частоты допускает более плавное регулирование скорости, что согласно с ГОСТ 32579.1-2013 позволяет принимать при расчёте механизма подъёма груза меньшее значение коэффициентов динамичности. При неправильной настройке параметров, определяющих характер разгона и торможения привода, а также время наложения тормоза, величина действующих динамических нагрузок может не соответствовать принятому при расчётах коэффициенту.

Влияние настройки системы управления на характеристики неустановившегося движения механизма в различных режимах работы, а также влияние самих режимов работы на функционирование привода и системы управления может быть продемонстрировано

с помощью экспериментальной установки, представляющей по своей конструкции обобщенный механизм грузоподъёмной машины с жесткими звеньями, позволяющей моделировать динамические процессы, происходящие в механизмах различного назначения (рис. 1).

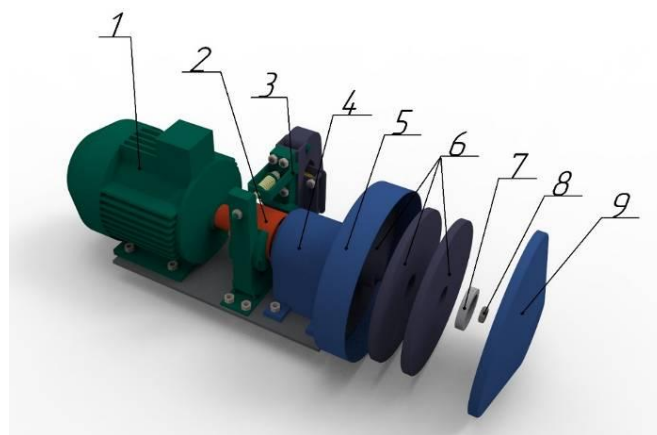


Рис. 1. Конструкция экспериментальной установки: 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – тормоз; 4 – подшипниковая опора; 5 – защитный кожух; 6 – диски; 7 – гайка; 8 – контргайка; 9 – торцевая крышка

Экспериментальная установка приводится в движение трехфазным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором АО2-31-6/4, способным развивать мощность 0,75 кВт при номинальной частоте вращения 950 об/мин и 1,1 кВт при частоте вращения 1450 об/мин. Инерционные параметры реального механизма имитируются с помощью трех дисков 6, закрепляемых на приводном валу с помощью специальной гайки 7 и контргайки 8. Регулированием количества дисков, расположенных на приводном валу, производится изменение приведенного момента инерции системы. Приводной вал опирается на подшипники опоры 4, а диски вращаются внутри защитного кожуха 5, который обеспечивает безопасность персонала при работе с установкой. Доступ внутрь защитного кожуха для изменения количества дисков обеспечивается торцевой крышкой 9. Для соединения приводного вала и вала электродвигателя использована упругая втулочно-пальцевая муфта 2, совмещенная с тормозным шкивом колодочного тормоза ТКТ-100, применяемого для торможения вращающихся масс различной инерции.

Для регулирования частоты вращения и движущего момента электродвигателя экспериментальной установки используется преобразователь частоты E2-8300-002H производства компании «Веспер» (рис. 2). Данный преобразователь частоты относится к векторным преобразователям без обратной связи и может работать как в режиме векторного, так и в режиме скалярного управления с поддержанием требуемого соотношения между напряжением и частотой тока питания электродвигателя (U/f). Программирование режимов работы преобразователя производится с помощью задания значений констант, отвечающих за основные функции преобразователя. Преобразователь E-8300 имеет встроенный программируемый логический контроллер. Встроенный контроллер может использоваться для создания разных схем функционирования экспериментальной установки в различных режимах работы.

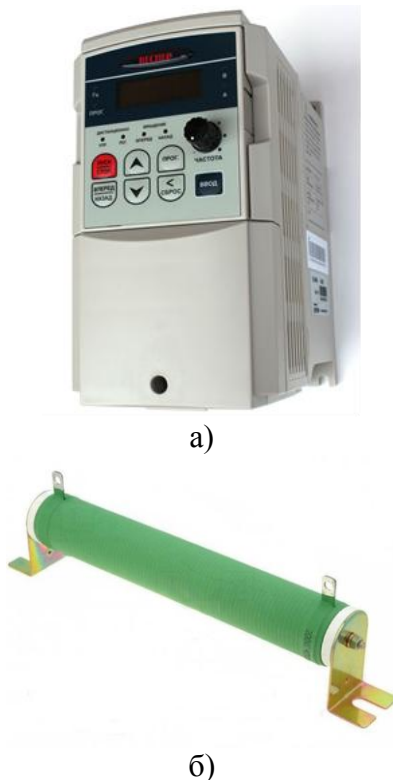


Рис.2. Элементы системы управления экспериментальной установкой:

а – преобразователь частоты «Веспер» E2-8300-002H; б – тормозной резистор TP-6,25

Экспериментальная установка способна производить разгон и торможение инерционных масс в неуправляемом и управляемом режиме. В первом случае разгон производит-

ся по естественной механической характеристике прямым подключением питающего напряжения к входным клеммам электродвигателя, а торможение инерционных масс производится механическим тормозом. Во втором случае контроль времени ускорения инерционных масс в режиме неустановившегося движения производится частотным преобразователем, причем торможение установки происходит в режиме противовключения электродвигателя. При этом кинетическая энергия установки преобразуется в электрическую и подаётся на тормозной резистор TP-6,25 сопротивлением 400 Ом и мощностью 200 Вт, где рассеивается в виде тепла.

Для снятия тепловых характеристик работы привода использовался тепловизор Fluke Ti40. Данный тепловизор способен фиксировать картину распределения теплового излучения с точностью $0,08^{\circ}\text{C}$, с пределом измерения от -22°C до $+110^{\circ}\text{C}$.

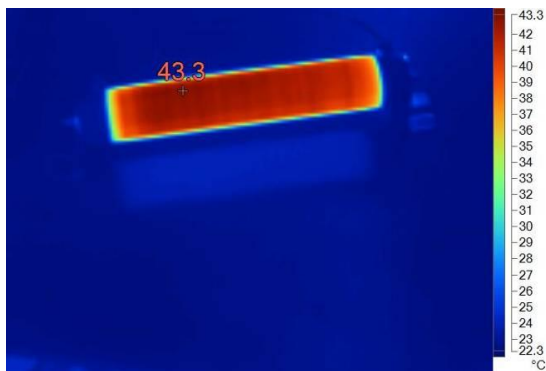
Для имитации полной динамической нагрузки привода использовались все три диска экспериментальной установки, при этом приведённый момент инерции вращающихся масс составлял $J_{np} = 0,294 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Для имитации работы механизма в порожнем состоянии (механизм подъема без груза) количество дисков уменьшено до двух, что соответствует приведённому моменту инерции $J_{np} = 0,202 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. И в том, и другом случае момент сопротивления движению механизма имеет одинаковую величину. Данное допущение не приведёт к значительному искажению результатов эксперимента, так как действующий момент сопротивления весьма мал и обусловлен трением в подшипниковых опорах приводного вала экспериментальной установки. К примеру, в случае торможения реального механизма подъема крана при работе на спуск груза приведенный момент сопротивления от веса груза лишь дополнительно увеличит нагрузку на систему управления.

В ходе эксперимента работа механизма моделировалась в лёгком (30 включений в час), среднем (90 включений в час), тяжёлом (180 включений в час) и весьма тяжёлом режиме работы (360 включений в час). Для обеспечения принятых режимов интервалы между включениями при работе механизма не должны были превышать 120 с, 40 с, 20 с, и 10 с соответственно. Эксперимент прово-

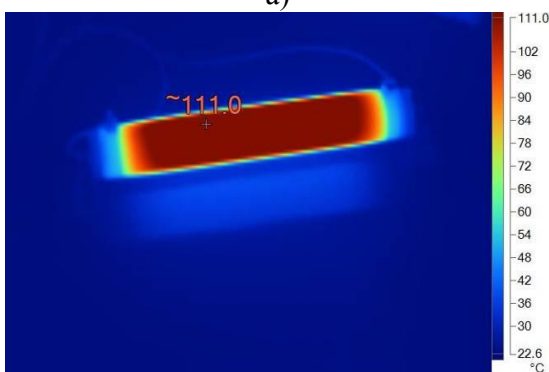
дился для трёх случаев настройки системы управления, в рамках которых время разгона и время торможения принимались равными 5 с, 4 с, и 3 с. В итоге было сформировано 12 комбинаций исходных экспериментальных параметров $R-t$, где первой буквой обозначается имитируемый режим работы крана, а вторая буква показывает установленное при этом время разгона-торможения.

Эксперимент включал в себя следующие этапы:

- 1) на приводном валу закреплялась необходимая инерционная нагрузка;
- 2) с помощью частотного преобразователя устанавливались требуемые значения времени разгона и торможения привода;
- 3) производилось моделирование работы привода для одной комбинации исходных параметров в течении периода испытания, равного 5 мин.;
- 4) при помощи тепловизора определялась температура элементов привода и силовых цепей системы управления в заданный момент времени.



а)



б)

Рис. 3. Термограммы тормозного резистора в течение одного периода испытаний:
а – в конце первого цикла работы механизма;
б – в конце заключительного цикла работы механизма

Так как количество затраченной на торможение энергии в единицу времени прямо пропорционально ускорению вращающихся масс при остановке механизма, для оценки величины динамической нагруженности привода во время неустановившегося движения при работе с различным ускорением и инерционными характеристиками проводилось измерение нагрева тормозного резистора (рис. 3, а, б). Измерение проводилось в конце каждого цикла работы механизма, что позволило получить данные о росте температуры резистора в течение одного отдельно взятого периода испытания.

Диаграмма распределения максимальных температур, достигнутых в рамках одного периода испытания с характерной комбинацией исходных параметров при работе механизма с полной инерционной нагрузкой, показана на рис. 4.

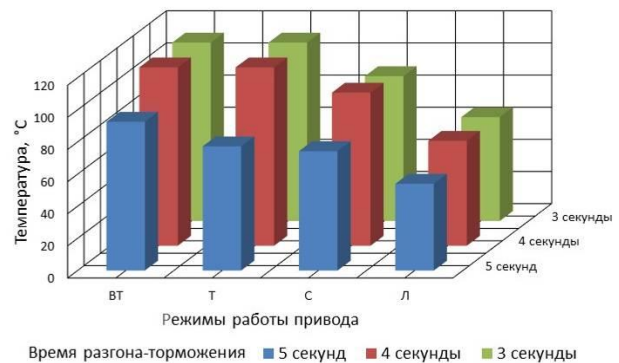


Рис. 4. Диаграмма распределения максимальных температур тормозного резистора при работе механизма с полной инерционной нагрузкой

Максимальная температура резистора увеличивается прямо пропорционально числу включений в час и обратно пропорционально времени торможения механизма. Следует отметить, что для комбинаций параметров VT-4, T-4 и T-3 максимальная температура резистора превысила верхний предел измерения тепловизора (110°C). А в ходе моделирования работы механизма для случая VT-3 произошла критическая перегрузка по току при торможении. Данный режим работы в комбинации с минимальным из рассматриваемых временем разгона-торможения является недопустимым для электро-механической схемы привода при данной нагрузке, даже несмотря на наличие в системе

тормозного резистора, и тот факт, что технические параметры частотного преобразователя полностью соответствуют параметрам электродвигателя и подбирались в строгом соответствии с методикой производителя.

Также установлено, что максимальные температуры тормозного резистора в комбинациях С-3, Л-3 незначительно отличаются от максимальных температур, определённых для комбинаций С-4, Л-4, и падают с увеличением времени разгона-торможения до 5 с (рис. 5).

Диаграмма величин максимальных температур, достигнутых в рамках одного периода испытания с характерной комбинаци-

ей исходных параметров при работе механизма без полезной нагрузки (порожнее состояние), показана на рис. 6. Можно отметить, что максимальные температуры резистора для каждой комбинации экспериментальных параметров уменьшаются. Так, разность максимальных температур резистора для комбинаций ВТ-5, Т-5, С-5, Л-5 между двумя моделируемыми режимами нагружения в зависимости от режима работы достигает от 47% до 62% при уменьшении приведённого момента инерции на 31,3% (рис. 7). Аналогично максимальная температура резистора для комбинаций с временем разгона-торможения 3 с и 4 с падает на 22-39%.

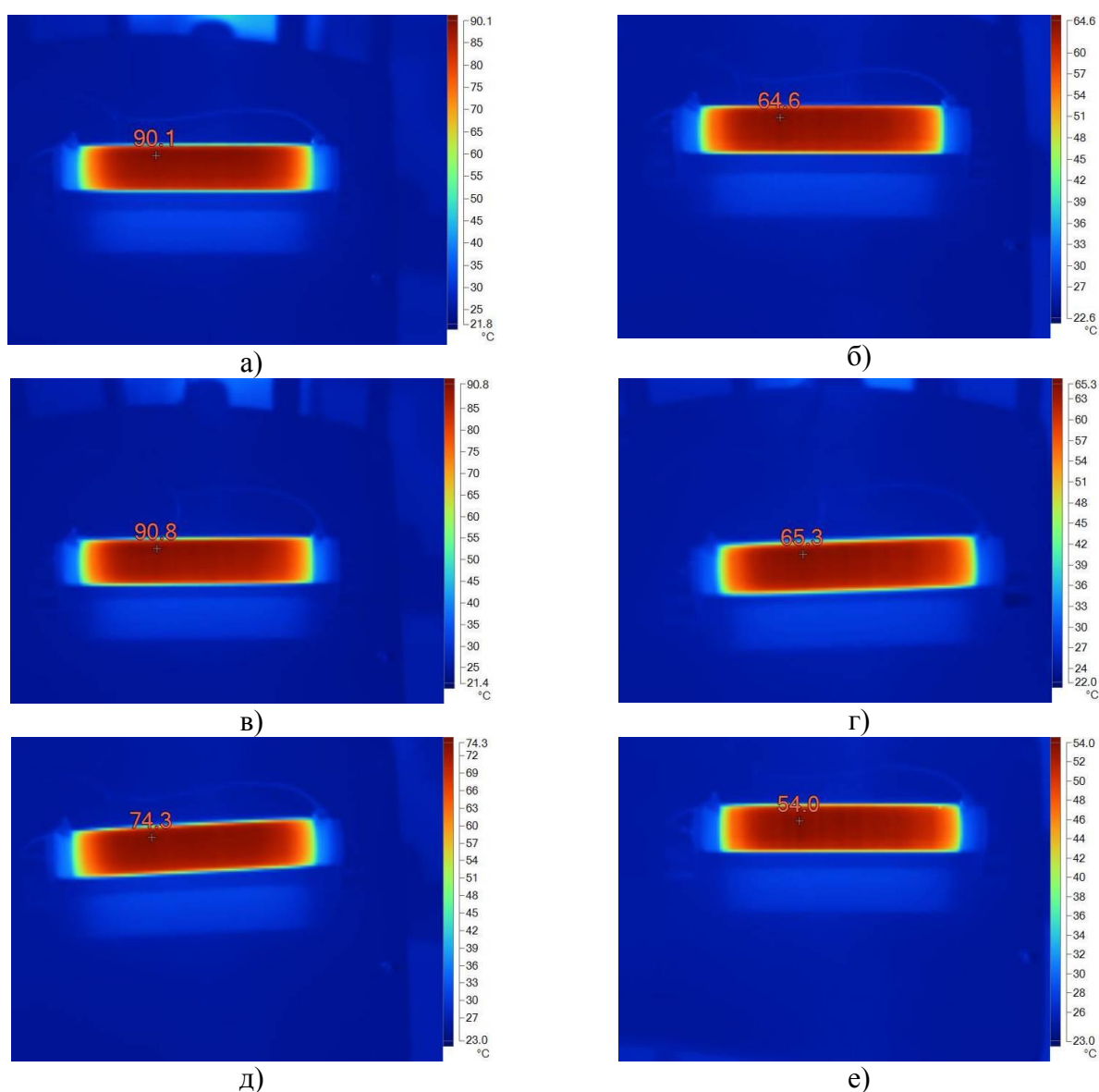


Рис. 5. Термограммы тормозного резистора для различных комбинаций экспериментальных параметров при работе привода с полной инерционной нагрузкой: а – комбинация С-3; б – комбинация Л-3; в – комбинация С-4; г – комбинация Л-4; д – комбинация С-5; е – комбинация Л-5

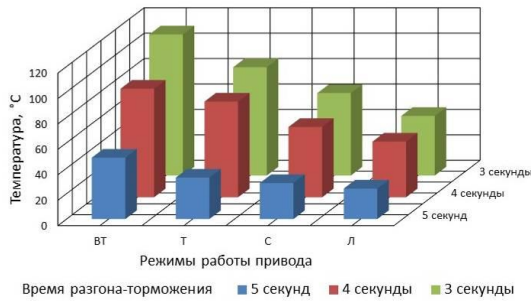
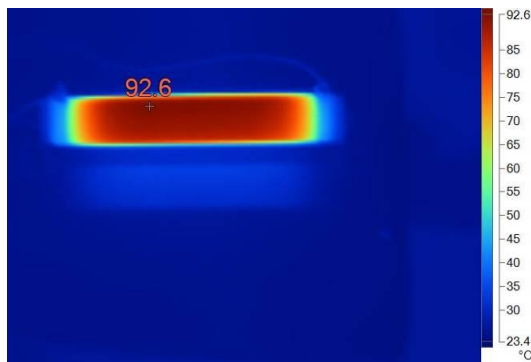
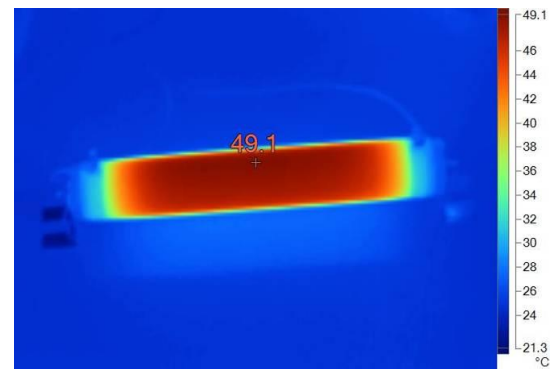


Рис. 6. Диаграмма распределения максимальных температур тормозного резистора при работе механизма без полезной нагрузки

Из диаграмм (рис. 4 и 6) также видно, что разница максимальных температур в комбинациях Т-5 и С-5 минимальна как при работе механизма с полной нагрузкой, так и в порожнем состоянии. Причём данное соотношение характеризуется не только максимальными значениями температур, а наблюдалось при каждом замере в течении всего периода эксперимента. При других комбинациях экспериментальных параметров подобного соотношения не наблюдалось.



а)



б)

Рис. 7. Термограммы тормозного резистора для комбинации параметров (VT-5):
а – при работе механизма с полной инерционной нагрузкой;
б – при работе механизма без полезной нагрузки.

В рамках эксперимента были проведены замеры температуры нагрева корпуса электродвигателя при работе в различных режимах с пуском от преобразователя частоты и непосредственным подключением обмоток во внешнюю питающую сеть. Полученные значения максимальных температур экспериментального цикла показаны на рис. 8. Замеры проводились при работе привода в тяжёлом, среднем, и лёгком режиме с установленным временем разгона-торможения равным 4 с (комбинации параметров Т-4, С-4, Л-4).

Как видно из диаграммы (рис. 9), при подаче тока из внешней питающей сети без применения преобразователя частоты, максимальные температуры нагрева корпуса двигателя для разных режимов работы значительно отличаются. Если параметры питающей сети задаются частотным преобразователем, максимальные температуры корпуса электродвигателя для рассмотренных режимов работы близки по значению и находятся в районе 30°C.

Дополнительно проводились измерения температуры корпуса электродвигателя при непрерывной работе в течении 10 мин. на номинальной частоте вращения, обеспечиваемой естественной характеристикой, а также на пониженной частоте вращения, получаемой снижением частоты питающего напряжения частотным преобразователем. В первом случае температура корпуса выросла на 3,1°C, во втором – на 2,2°C.

Проведённый эксперимент наглядно демонстрирует влияние настроек системы управления (времени разгона-торможения, задаваемого с помощью преобразователя частоты) на эксплуатационные характеристики привода. Полученный результат позволяет говорить о правильности настройки системы управления с частотным преобразователем, как о важном факторе, определяющем величину динамических нагрузок, действующих на несущую металлоконструкцию тележки, безопасность работы грузоподъемной машины, а также долговечность отдельных узлов привода и системы управления.

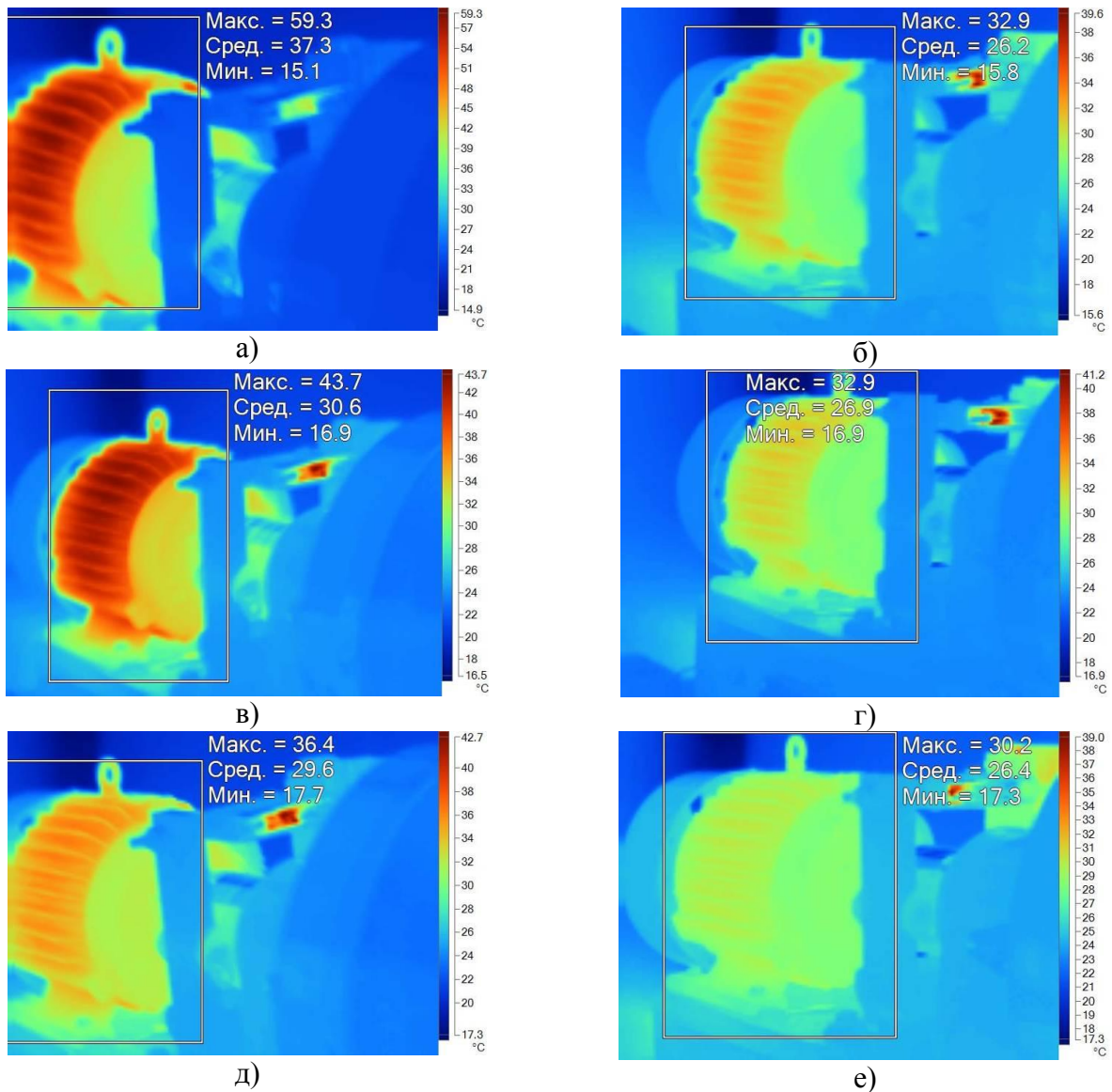


Рис. 8. Термограммы корпуса электродвигателя при работе привода в различных режимах работы: а – привод работает в тяжелом режиме без преобразователя частоты; б – привод работает в тяжёлом режиме с управлением от преобразователя частоты; в – привод работает в среднем режиме без преобразователя частоты; г – привод работает в среднем режиме с управлением от преобразователя частоты; д – привод работает в лёгком режиме без преобразователя частоты; е – привод работает в лёгком режиме с управлением от преобразователя частоты

Последовательность расчёта, приведённая в ГОСТ 32579.1-2013 и других нормативных документах, не отражает влияние настройки системы управления на действующие динамические нагрузки. Разные параметры настройки системы управления механизмом могут приводить к повышению динамической составляющей действующей нагрузки даже в системах с бесступенчатым плавным регулированием скорости. В этом случае эксплуатационные преимущества подобных систем сводятся к минимуму, а значения выбранных коэффициентов динамич-

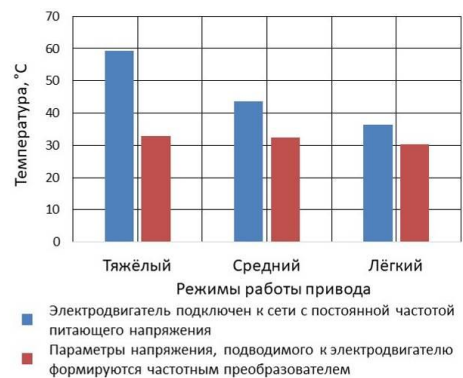


Рис. 9. Диаграмма максимальных температур корпуса электродвигателя при работе привода в различных режимах

ности не соответствуют реальному уровню нагруженности грузоподъемной машины.

В рамках создания методики проектирования крановых тележек на основе универсальной компоновочной схемы их металлоконструкции выделяются два возможных пути решения данной проблемы:

1) выбор максимально жестких динамических коэффициентов в рамках принимаемых комбинаций нагрузок без учета типа системы управления;

2) проведение подробного комплексного проектирования механизмов крана, расположенных на грузовой тележке, с анализом их динамических характеристик с целью подбора не только типоразмера системы управления, но и подготовки рекомендаций по настройке временных параметров данной системы с учетом режима работы (уровня нагрева, установления необходимости применения дополнительных устройств для отвода тепла).

Дополнительно для обеспечения правильной работы системы управления с учетом анализа данных описанного эксперимента должны быть выполнены следующие условия:

1. Технические параметры элементов системы управления должны обеспечивать бесперебойную работу грузоподъемной машины в наиболее тяжёлом режиме из возможных. Это позволит избежать возникновения критических перегрузок при разгоне и торможении механизмов. В противном случае перегрузки по току могут возникать даже в тех системах, где все элементы полностью соответствуют друг другу по мощности, что было продемонстрировано в рамках проведенного эксперимента.

2. Настройка системы управления должна производиться на время неустановившегося движения, при котором динамические нагрузки, возникающие в элементах грузоподъемных машин, будут иметь минимальное значение. С другой стороны, длительность рабочего цикла с учётом выбранного времени неустановившегося движения, должна обеспечивать требуемую производительность работы (технологические ограничения). Оптимальное время неустановивше-

гося движения может определяться исходя из результатов численного моделирования работы механизма. При этом в качестве ограничения необходимо использовать тепловые характеристики элементов применяемых систем управления (в частности, тормозных резисторов) с учетом режима работы крана.

Список литературы

1. Гончаров, К.А. Модульная металлоконструкция рамы грузовой тележки крана мостового типа / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научное обозрение. – 2017. – №16 – С. 13-16.

2. Гончаров, К.А. Подход к проектированию опорных тележек кранов общего назначения мостового типа с учётом универсальной компоновочной схемы их металлоконструкции / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – №3 – С. 43-49.

3. Гончаров, К.А. Универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа / К.А. Гончаров, И.А. Денисов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – №1 – С. 60-66.

4. Лагереv, А.В. Нагруженность подъёмно-транспортной техники / А.В. Лагереv. – Брянск: БГТУ, 2010. – 180 с.

5. Певзнер, Е.М. Электропривод грузоподъёмных кранов / Е.М. Певзнер, Е.В. Попов, М.И. Аксеноv, Г.Б. Онищенко. – Москва: Россельхозакадемия, 2006. – 168 с.

Об авторах

Гончаров Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъёмно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», *ptm_bstu@mail.ru*.

Денисов Илья Александрович – аспирант кафедры «Подъёмно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», *ilia.denisow@yandex.ru*.

INVESTIGATIVE STUDY OF HOISTING MACHINE LOADING WHEN USING FREQUENCY CONVERTER CONTROLLING SYSTEMS

Goncharov K.A., Denisov I.A.

Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

The paper deals with the impact of the controlling system adjustment on the level of the dynamic loads operating on the hoisting machine parts during the period of the non-steady motion. The impact of the operating regime of the hoisting machine generalized mechanism on the consistency of operation and the variation of the parameters of the mechanism controlling system with the electric drive and frequency converter is experimentally shown. The procedure of the experiment is described; there are given the comparative results of the variation of the mechanism performance when it works using the controlling system with the frequency converter and brake resistor, and without it, when working on the natural parameters. There are conclusions about adequacy of the normative method for the dynamic coefficient option, determining the loading of the hoisting machine metalware, and in case of occurrence of adjustment errors in the frequency converter controlling system.

Key words: *drive, controlling system, frequency converter, brake resistor, load trolley, operating regime of the mechanism, hoisting machine.*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-01-31-39

References

1. Goncharov K.A., Denisov I.A. Modular metal structure of the frame of the jib crab of the bridge crane. *Nauchnoe obozrenie*, 2017, No. 16, pp. 13-16. (In Russian)

2. Goncharov K.A., Denisov I.A. Approach to support truck design for general purpose cranes of bridge type taking into account universal layout diagram of their metal structure. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, No. 3, pp. 43-49. DOI:10.12737/article_59b11cbd491971.92745634 (In Russian)

3. Goncharov K.A., Denisov I.A. Multipurpose layout drawing of metalware of bridge crane load trolley. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 60-66. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66. (In Russian)

4. Lagerev A.V. *Nagruzhennost pod'yemno-transportnoy tekhniki* [Loading of lifting-transport equipment]. Bryansk, BGTU, 2010. 180 p. (In Russian)

5. Pevzner E.M., Popov E.V., Aksenov M.I. Onishchenko G.B. *Elektroprivod gruzopodemykh kranov* [Electric drive of load-lifting cranes]. Moscow, Rosselkhozakademiya, 2006. 168 p. (In Russian)

Authors' information

Kirill A. Goncharov – PhD in Technical Sciences, associate Professor, head of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, *ptm_bstu@mail.ru*.

Iliya A. Denisov – postgraduate student of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, *ilia.denisov@yandex.ru*.

Дата принятия к публикации
(Date of acceptance for publication)
10.03.2018

Дата публикации
(Date of publication):
25.03.2018

