

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 681.5

doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-21-31

## СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ТОЧНОСТИ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРАН-МАНИПУЛЯТОРА МЕХАНОСБОРОЧНОГО УЧАСТКА

Илгар Рафаель оглу Алиев<sup>1✉</sup>, Джаваншир Фирудин оглу Мамедов<sup>2</sup>, Курбан Садых оглу Абдуллаев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанский государственный нефтяной индустриальный университет АГНИУ, Баку, Азербайджан

<sup>2,3</sup> Сумгаитский государственный университет СГУ, Сумгаит, Азербайджан

<sup>1,3</sup> cavan62@mail.ru

<sup>2</sup> cavan62@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1998-3137>

### Аннотация

Поставлена задача выбора и исследования информационно-измерительных элементов и исполнительных механизмов для комплексной автоматизации технологических станков на основе анализа механосборочных производственных участков в области машиностроения. Цель статьи: создание информационного обеспечения измерительных средств и исполнительных механизмов для реализации процесса автоматизации кран-манипулятора, обслуживающего гибкий производственный участок с механосборочными станками.

Поставлены вопросы: технологический анализ объекта исследования на основе рекурсивных процедур; определение операций измерения и исполнительных механизмов на активных элементах гибкого производственного участка, в том числе, операций кран-манипулятора, токарного, фрезеро-вального, радиально-сверлильного станков; иссле-

дование вопроса по проектированию кран-манипулятора с захватным устройством; расчет мощности исполнительного механизма кран-манипулятора для выбора грузоподъемности его захватного устройства.

Поставлена задача создания информационного обеспечения измерительных и исполнительных устройств для механосборочных станков и кран-манипулятора, обслуживающего эти станки. Для ее реализации по определению мощности привода кран-манипулятора была построена математическая модель трансмиссии и требуемая характеристика отпускания нагрузки в режиме торможения.

**Ключевые слова:** механосборочный цех, кран-манипулятор, привод, устройство, информационное обеспечение.

Ссылка для цитирования:

Алиев И.Р. Создание математического обеспечения для точности выбора технических свойств кран-манипулятора механосборочного участка / И. Р. Алиев, Д. Ф. Мамедов, К. С. Абдуллаев // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 6. – С. 21-31. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-21-31.

Original article

Open Access Article

## DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR THE ACCURACY OF SELECTING THE CRANE-MANIPULATOR TECHNICAL PROPERTIES OF THE MECHANICAL ASSEMBLY SITE

Ilgar Rafael oglu Aliev<sup>1✉</sup>, Javanshir Firudin oglu Mamedov<sup>2</sup>, Kurban Sadikh oglu Abdullaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Azerbaijan State Oil and Industry University ASOIU, Baku, Azerbaijan

<sup>2,3</sup> Sumgayit State University SSU, Sumgayit, Azerbaijan

<sup>1,3</sup> cavan62@mail.ru

<sup>2</sup> cavan62@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1998-3137>

### Abstract

The task is set to select and study information and measuring elements and actuating mechanisms for

complex automation of CNC machines based on the analysis of mechanical assembly production sites in the

field of mechanical engineering. Paper objective is to develop information support for measuring instruments and actuating mechanisms to implement the automation of a crane manipulator serving a flexible production site with mechanical assembly machines. The following problems are stated: technological analysis of the research object based on recursive procedures; determination of measurement operations and actuating mechanisms on the active elements of a flexible production site, including manipulator crane operations, turning, milling, radial drilling machines; study of the issue of designing a crane manipulator with a clamp;

*Reference for citing:*

*Aliiev R, Mamedov JF, Abdullaev KS. Development of mathematical support for the accuracy of selecting the crane manipulator technical properties of the mechanical assembly site. Transport Engineering. 2023; 6:21-31. doi: 10.30987/2782-5957-2023-6-21-31.*

## **Введение**

Механосборочные цеха и их технологические единицы, предназначенные для изготовления механических частей и изделий различного машиностроительного оборудования, характеризуются сложными и комплексными операциями [1, 2]. При этом требуются точные измерения и выполнения технологических операций станков, а также точность позиционирования, торможения и переналадка грузоподъемности захватного устройства кран-манипулятора для автоматизации обслуживания производственных модулей. Рассматриваемые вопросы по реализации вопросов выбора элементов технологического измерения, приводов и определения их энергетических параметров, решены в недостаточном объеме и не на должном уровне соответствуют специфике исследуемых производственных процессов. В этой связи, рассмотрение вопроса по созданию информационного обеспечения технологических операций станков механосборочного участка и кран-манипулятора, моделирования процессов их измерения и выполнения операций приводов, а также определения требуемых энергетических параметров, обеспечивающее точность автома-

calculation of the power of the crane manipulator actuator to select the load capacity of its clamp.

The task is set to develop information support for measuring and actuating devices for machine-assembling machines and crane manipulators servicing the machine body. To determine the power of the manipulator crane drive, a mathematical model of the transmission and the required characteristics of the load release in braking mode are constructed.

**Keywords:** mechanical assembly shop, crane manipulator, drive, device, information support.

тизации, является научно-актуальной задачей.

Создание информационного обеспечения измерительных средств и исполнительных механизмов с определением их энергетических параметров для реализации более надежной автоматизации кран-манипулятора, обслуживающий гибкий производственный участок с механосборочными станками является целью статьи. Для ее реализации поставлены следующие вопросы:

1. Технологический анализ объекта исследования – механосборочного производственного участка основе рекурсивных процедур;

2. Определения операций измерения и исполнительных механизмов на активных элементах гибкого производственного участка, в том числе операций кран-манипулятора, токарного, фрезеровочного, радиально-сверлильного станков; исследования вопроса по проектированию кран-манипулятора с захватным устройством;

3. Расчет мощности исполнительного механизма для выбора грузоподъемности захватного устройства кран-манипулятора.

## **Исследование механосборочного производственного участка**

Выбранный в качестве объекта исследования гибкий механосборочный участок (ГМУ) состоит из гибкого производственного модуля:

- токарного станка (ГПМТС);
- фрезерного станка (ГПМФС);

– радиально-сверлильного станка (ГПМРСС);

– гибкого производственного модуля гибочного станка (ГПМГС).

Механосборочный участок (МСУ), оснащенный цифровой системой управле-

ния, обслуживается кран-манипулятором, который выполняет автоматизированное перемещение и загрузку механосборочных станков [3, 4]. Технологические операции крана-манипулятора выполняются на специальной монорельсовой опоре.

Для обеспечения автоматизирован-

ных операций всех станков в гибких производственных модулей по принципу комплексного обслуживания, взаимосвязанности, гибкости и безопасности, предлагается круговая компоновочная структура (рис. 1).

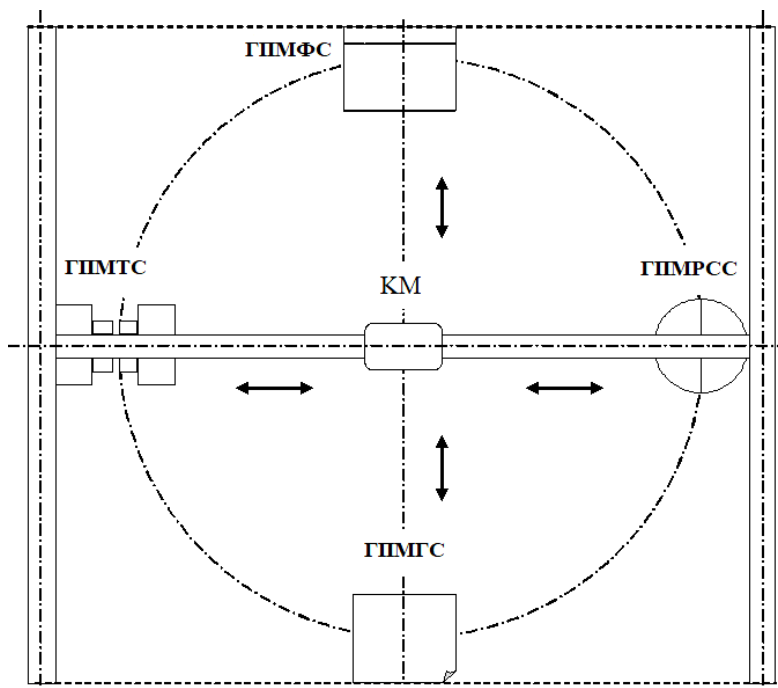


Рис. 1. Круговая компоновочная схема гибкого механосборочного участка  
 Fig. 1. Circular layout diagram of a flexible mechanical assembly site

Рассмотрим вопрос технологического анализа некоторых станков исследуемого механосборочного гибкого производственного участка. Для этого проведем анализ технологического измерения, работы приводов, системы контроля и управления активных элементов ГПУ (на примере операций кран-манипулятора и токарного станка), основанные на его энергетических, функциональных и конструктивных характеристиках [5]. Кран-манипулятор на монорельсе между рабочими модулями ГПУ совершает линейные перемещения и последовательно загружает заготовку на ГПМТС, ГПМФС и ГПМРСС. На основе цифровой системы управления каждый станок оснащен автоматической обработкой, резкой и сверлением стальной заготовки вала в соответствии с требуемыми размерами. Техноло-

гические операции крана-манипулятора (КМ) делятся на состояния  $P_i$  и переходы  $T_i$ . Последовательность технологических операций, выполняемых в рабочих модулях ГПУ с измерением, приводом и контролем показаны в табл. 1.

На основании состояний  $P_i$  и переходов  $T_i$ , приведенных в табл. 1, определяются типы и количество измерительных и исполнительных механизмов по характеристикам технологических операций кран-манипулятора и токарного станка [6]. Учитывая, что основными действующими элементами, обслуживающими и выполняющими механические операции в ГПУ, являются кран-манипулятор и станки, совокупность их датчиков и исполнительных механизмов выражается в виде таблиц (табл. 2 и табл. 3).

$P_i$	Состояние кран-манипулятора и станка ГПУ ( $P_i$ )	Датчик	$T_i$	Переход ( $T_i$ )	Исполнительный механизм
Операции кран-манипулятора					
$P_1$	Позиционирование КМ в центре ГПУ	Датчик позиционирования ( $D_{1км}$ )	$T_1$	Позиционирован	Двигатель тельфера в режиме холостого хода ( $M_{10}$ )
$P_2$	Прямолинейное движение вниз КМ	Датчик линейного перемещения вниз ( $D_{2км}$ )	$T_2$	Выполнено	Двигатель тельфера срабатывает ( $M_{11}$ - линейное перемещение вниз)
$P_3$	Захват заготовки	Датчик закрытия захвата ( $\neg D_{4км}$ )	$T_3$	Выполнено	Двигатель закрытия захвата срабатывает ( $M_{32}$ )
$P_4$	Перемещение заготовки прямолинейно вверх посредством КМ	Перемещение заготовки прямолинейно вверх посредством КМ ( $\neg D_{2км}$ )	$T_4$	Выполнено	Двигатель тельфера срабатывает ( $M_{12}$ - линейное перемещение вверх)
$P_5$	Перемещение заготовки прямолинейно влево (вперед) посредством КМ	Перемещение заготовки прямолинейно вперед посредством КМ ( $D_{3км}$ )	$T_5$	Выполнено	Двигатель тельфера срабатывает ( $M_{12}$ - линейное перемещение вперед)
$P_6$	Перемещение заготовки прямолинейно вниз посредством КМ в рабочую зону токарного станка	Датчик линейного перемещения вниз ( $D_{2км}$ )	$T_2$	Выполнено	Двигатель тельфера срабатывает ( $M_{11}$ - линейное перемещение вниз)
$P_7$	Позиционирование токарного станка	Датчик открытия захвата ( $D_{4км}$ )	$T_3$	Выполнено	Двигатель открытия захвата срабатывает ( $\neg M_{32}$ )
$P_8$	Перемещение заготовки прямолинейно вверх посредством КМ	Перемещение заготовки прямолинейно вверх посредством КМ ( $\neg D_{2км}$ )	$T_4$	Выполнено	Двигатель тельфера срабатывает ( $M_{12}$ - линейное перемещение вверх)
Операции токарного станка					
$P_9$	Резка вала-заготовки ( $d=40$ мм) 1-ой ступени вала на токарном станке ( $d=35$ мм, $l=80$ мм)	Датчик углового перемещения ( $S_{11td}$ ) и датчик линейного перемещения ( $S_{12td}$ )	$T_5$	Выполнено	Одновременное срабатывание двигателя вращательной резки вала ( $M_3$ ) и линейного перемещения ( $M_4$ )
$P_{10}$	Резка вала-заготовки 2-ой ступени вала на токарном станке ( $d=30$ мм, $l=30$ )	Датчик углового перемещения ( $S_{21td}$ ) и датчик линейного перемещения ( $S_{22td}$ ) токарного станка	$T_6$	Выполнено	Одновременное срабатывание двигателя вращательной резки вала ( $M_3$ ) и линейного перемещения ( $M_4$ )
$P_{11}$	Резка вала-заготовки 3-ей ступени вала на токарном станке ( $d=25$ мм, $l=20$ )	Датчик углового перемещения ( $S_{31td}$ ) и датчик линейного перемещения ( $S_{32td}$ )	$T_7$	Выполнено	Одновременное срабатывание двигателя вращательной резки вала ( $M_3$ ) и линейного перемещения ( $M_4$ )
$P_{12}$	Завершение и позиционирование ступенчатого вала в токарном станке	Датчик положения ступенчатого вала ( $S_{4td}$ )	$T_8$	Выполнено	Позиционирование заготовки на токарном станке

Таблица 2

Типы датчиков, используемых в операциях КМ, и их энергетические характеристики

Table 2

*Types of sensors used in crane manipulator operations and their energy characteristics*

№	Тип операции КМ	Датчик	Тип датчика	Энергетические показатели
1	Позиционирование КМ	$S_{1\text{км}}$	Датчик позиционирования (LWH-0450)	С аналоговым выходом Напряжение – 0...42 В; Род тока – постоянный
2	Прямолинейное движение КМ вниз	$S_{2\text{км}}$	Датчик линейных перемещений (LWH-0500)	
3	Прямолинейное движение КМ вверх	$\neg S_{2\text{км}}$		
4	Прямолинейное движение КМ вперед	$S_{3\text{км}}$		
5	Прямолинейное движение КМ назад	$\neg S_{3\text{км}}$		
6	Открытие захватного устройства КМ	$S_{4\text{км}}$	Магниторезистивный IP67	С аналоговым выходом Напряжение – 0...24 В
7	Закрытие захватного устройства КМ	$\neg S_{4\text{км}}$		

Таблица 3

Типы приводов, выполняющих операции КМ, и их энергетические свойства

Table 3

*Types of drives performing crane manipulator operations and their energy properties*

№	Тип операции КМ	Двигатель	Тип двигателя	Энергетические показатели
1	Позиционирование КМ	$M_{10}$	Тельфер двигатель КГЭ 1605-6	Напряжение – 220 В, Мощность – 0,75 кВт, Количество циклов – 910 д/мин.
2	Прямолинейное движение КМ вниз	$M_{11}$		
3	Прямолинейное движение КМ вверх	$M_{12}$		
4	Прямолинейное движение КМ вперед	$M_{21}$		
5	Прямолинейное движение КМ назад	$M_{22}$		
6	Открытие захватного устройства КМ	$M_{31}$	Электромеханический двигатель ДТ35	Напряжение – 0...24 В
7	Закрытие захватного устройства КМ	$M_{32}$		

### Выбор мощности кран-манипуляторной трансмиссии

Анализ многочисленных и сложных технологических операций, выполняемых краном-манипулятором в ГПУ, показывает, что в связи с тем, что изготавливаемые изделия имеют разные размеры, массу и конструкции, правильный подбор мощности исполнительного механизма крана-манипулятора и его корректировка в соот-

ветствии с особенностями операций считается одним из важных вопросов.

Мощность трансмиссии, применяемой в кране-манипуляторе, выбирают по относительному времени соединения, коэффициенту использования подъемного механизма [7]  $K_{zp}$ , суточному  $K_g$  и годовому коэффициенту использования  $K_i$ .

Относительное время подключения механизма  $t_{qm}$ ,

$$t_{qm} = t_{is} \frac{100}{t_{is} + t_6}, \% \quad (1)$$

Здесь  $K_{qr} = G_{qr}/G_n$ ;

$$K_g = \frac{m_c}{24}; \quad K_i = \frac{A_i}{365}, \quad (2)$$

где  $t_o$  – время перерыва, соответствующее 1 такту двигателя соответственно;  $G_y$ ,  $G_n$  – средняя масса груза и номинальная масса подъема за одну смену соответственно;  $m_c$  – количество часов работы двигателя в сутки;  $A_q$  – количество дней работы двигателя в году. Стандартные значения  $t_{gm}$  равны 15; 25; принимаются 40 и 60 %. При получении этих значений учитывается температура окружающей среды.

Кран-манипулятор имеет четыре номинальных режима работы: легкий, средний, тяжелый и очень тяжелый.

В модуле механосборочного участка кран-манипулятор работает в тяжелых условиях. Для этих условий  $K_i = 1$ ;  $K_c = 1$ ;  $t_{zm} = 25$  и 40 %; количество подключений 300-400 в час и температура окружающей среды принимается равной 450 °С. Трансмиссии, выбираемые для крана-манипулятора, должны отвечать следующим требованиям [8]:

1. Он не должен нагреваться выше допустимой температуры при заданном графике рабочих нагрузок и должен соответствовать температурному требованию изоляции обмоток двигателя;

2. В нормальных условиях и при перегрузке увеличение крутящего момента должно преодолеть нагрузку.

3. Должна быть возможность придать нагруженному механизму необходимую скорость, чтобы избавиться от большого импульса при малой загрузке механизма.

Подбор осуществляется в следующем порядке: сначала подводится к валу двигателя рассчитывается статическая нагрузка. Затем двигатель выбирается из каталога и проверяется на перегрузку и холостой ход.

Статическая сила и момент, действующие на вал электродвигателя подъемной лебедки записывается в виде:

$$P = \frac{(G+G_0)g}{\eta} 10^{-3} \quad (3)$$

$$M = \frac{(G+G_0)D_b}{2i\eta} \quad (4)$$

где  $M$  – крутящий момент на валу электродвигателя (трансмиссии) (Нм);  $P$  – статическая сила на валу (кВт);  $G$ ,  $G_0$  – соответственно масса полезного груза (Н), масса поднимаемого груза (Н);  $g$  – скорость подъема (м/с);  $D_b$  – диаметр барабана подъемной лебедки (м);  $\eta$  – подъемный механизм.

Мощность в разгрузочном режиме определяется в виде

$$P = P_s - P_y \quad (5)$$

где  $P_s$  – сила трения;  $P_y$  – мощность, вырабатываемая сниженной нагрузкой.

При условии  $P_y > P_s$ ,

$$P_{s.bx} = (G + G_0) \eta \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \quad (6)$$

При опускании легкого груза или пустого захватного устройства крана-манипулятора предполагается, что  $P_y > P_s$ . На момент расчета мощности крана-манипулятора, двигатель тельфера зависит от нагрузки заготовки, устанавливаемый на станок. Бывает что, захват загружен на 100 % относительно номинальной  $\eta = 0,65 \div 0,87$ . Если же нагрузка 20 % относительно номинальной, то  $\eta = 0,3 \div 0,65$ .

Если кран-манипулятор перемещается прямолинейно в горизонтальном направлении, то момент и мощность на валу двигателя в статическом режиме запишем в виде [9]:

$$P = \frac{k(G+G_1)(\mu r + f)g}{R\eta} \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

$$M = \frac{k(G+G_1)(\mu r + f)}{i\eta} \quad (8)$$

где  $G$ ,  $G_1$  – соответственно сила тяжести, возникающая при перемещении груза, сила тяжести механизма продвижения;  $g$  – ско-

рость движения вперед м/с;  $R$ ,  $r$  – радиус колеса и буртика соответственно;  $\mu$  – коэффициент трения скольжения накладок

(для накладок качения  $\mu = 0,015 - 0,02$ , для накладок скольжения  $\mu = 0,08 \div 0,15$ )  $f$  – коэффициент трения качения подвижного колеса  $f = (0,0005 \div 0,001)M$ ;  $\eta$  – действие подвижного механизма;  $R$  – коэффициент, учитывающий трение, создаваемое в реле ( $R = 1,2 \div 2,6$ );  $i$  – передаточное число редуктора подвижного механизма.

$$t_{k2} = \frac{(GD^2)_{get}}{40} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{\pm M \pm M_s} \quad (9)$$

где  $M, M_s$  – соответственно статический момент двигателя и нагрузки;  $(GD^2)$  – момент, подводимый к валу электропередачи и механизма.

Если принять момент от опускания груза и динамический момент постоянными, то время опускания груза будет записана в виде [10]:

$$t_{en} = \frac{(GD^2)_{get} \omega_n}{40(M_{oren} - M_s)} \quad (10)$$

где  $\omega_n$  – номинальная угловая скорость двигателя;  $M_{oren}$  – средний пусковой момент двигателя.

По ориентировочному расчету среднее время опускания механизма в 2-3 раза больше, чем время движения механизма.

При этом время торможения двигателем определяется в виде:

$$t_t = \frac{(GD^2)_{get} \omega}{40(M_t + M_s)} \quad (11)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вала двигателя;  $M_t$  – тормозной момент;

Определим время работы трансмиссии за один период  $t_2 = \frac{l_2}{g_2}$ ,  $l_2$  равно средней длине пути,  $g_2$  среднее значение рабочей скорости. При этом  $t_{en}/t_i = 0,1$  для кран-манипулятора:  $t_{en}/t_i = 0,2$  перемещение механизмов.

Эквивалентная мощность за один период при непрерывной работе определяется в виде:

$$P_{e.i} = \alpha P$$

Статические данные собираются во время фактической работы кранов и анализируются с использованием метода номинальной работы.

Определяют продолжительность опускания  $t_e$  груза и торможения  $t_t$  трансмиссии.

Изменение угловой скорости двигателя  $\omega_1$  от до  $\omega_2$

где  $\alpha$  – постоянный коэффициент, относящийся к крану-манипулятору.

При этом  $t_{en}/t_i = 0,1$ ,  $\alpha = 0,85 \div 1,15$ .

Из проведенного расчета выбирается номинальный режим работы электродвигателя крана-манипулятора для различных условий работы:

$t_{od} = 25$  или  $40$  %;

$P_{25} = K_i P_{ei}$ ;

$P_{40} = K_2 P_{ei}$ .

В тяжелых режимах  $K_1 = 1,5$ ;  $K_2 = 1,0$ .

Как следствие тип двигателя кран-манипулятора выбирается из каталога. Выбранный тип двигателя проверяется на загрузку.

Для обеспечения стабильного ускорения кран-манипулятора примем условие

$M_{или} > 1,5$  млн,

где  $M_{или, is}$  –1,5 % – средний пусковой момент при низком напряжении;  $M$  – момент подъема груза.

Проверим двигателя кран – манипулятора на максимальную нагрузку. Тогда принимается нижеследующее условие:

$$M_{mak y} \leq KM_{mak.mh}$$

где  $K = 1,15$  указывает на падение напряжения в сети;  $M_{mak.mh}$  – максимальный крутящий момент двигателя;  $M_{mak y}$  – нагрузки.

Для нахождения тока намагничивания и относительного смещения границы в цепи ротора двигателя построим замещающую схему, соответствующую динамическому режиму. Планируемая схема замены представлена на рис. 2.

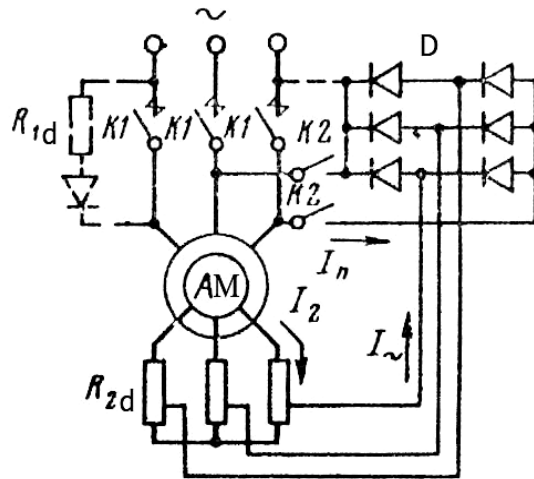


Рис. 2. Схема цепи ротора двигателя кран-манипулятора в динамическом режиме  
 Fig. 2. Motor rotor circuit diagram of the crane manipulator in dynamic mode

В частном случае частота тока  $f_1 = 0$ , синхронная скорость  $\omega_0 = 0$  и абсолютное скольжение

$$S_a = -\frac{\omega}{\omega_{on}},$$

где  $\omega_{on} - f_{1n} = 50 \text{ Hz}$  это синхронная скорость, соответствующая частоте.

Уравнения, позволяющие раскрыть статическую механическую характеристику в режиме динамического торможения по разработанной схеме замещения и векторной диаграмме, записываются в нижеследующем виде:

$$(E_2^1)^2 = I_\mu^2 X_\mu^2 = (I_2^1)^2 \left[ \left( \frac{R_2'}{S_a} \right)^2 + X_2'^2 \right]$$

$$I_{ek}^2 = I_\mu^2 + I_2'^2 + 2(I_2^1)^2 \cdot \frac{X_2'}{X_\mu} \quad (12)$$

$$M = 3I_2'^2 \frac{R_r'}{\omega_{on} S_a}$$

где  $I_{ek}$  – трехфазный переменный эквивалентный ток статора,  $I_\mu$  – ток намагничивания;  $I_2'$  – ток от ротора;  $X_\mu = \frac{E_1}{I_\mu}$  – намагничивающий реактивное сопротивление;  $E_1, E_2'$  –  $ehq$  фаз статора и ротора соответственно;  $R_2', X_2'$  – активное и реактивное сопротивление, подводимое от ротора. Если учесть, что токи от эквивалентных статора и ротора в динамическом режиме, показанном на рис. 2 не связаны, тогда

$$I_{ek} = \frac{K_{sx} K_s K_T}{K_0} \cdot I_2' = K_r I_2' \quad (13)$$

где  $K_{sk} = \frac{I_{ek}}{I_s}$  – коэффициент схемы соединения обмоток статора;  $I_n$  – постоянный ток на выходе выпрямителя;  $K_0 = \frac{I}{I_s}$  – коэффициент цепи выпрямителя,  $K_s = \frac{I}{I_2}$  – коэффициент шунтирования выпрямителя;  $K_T$  – коэффициент трансформации двигателя;  $K$  – коэффициент корреляции.



Если учесть выражение (13) в системе (12) и провести некоторые преобразования, то получим:

$$I_{\mu}^2 = (I_2')^2 \left( K_2^2 - 1 - 2 \frac{X_2'}{X_{\mu}} \right) \quad (14)$$

С другой стороны, если

$$I_{\mu}^2 = \frac{\left( \frac{R_2'}{S_a} \right)^2 + (X_2')^2 (I_2')^2}{X_{\mu}^2} \quad (15)$$

Из равенства выражений (14) и (15) получается условие самовоздействия, т. е.

$$\left[ K_r^2 - \left( 1 + \frac{X_2'}{X_{\mu}} \right)^2 \right] \geq \left( \frac{R_2'}{X_{\mu} S_a} \right)^2 \quad (16)$$

Анализируя выражение (16), можно найти, что

$$K_2 \leq \left( 1 + \frac{X_2'}{X_{\mu}} \right)$$

при выполнении условия в двигателе происходит самовозбуждение при любых оборотах и переключениях.

Если выполняется условие

$$K_r > 1 + \frac{X_r'}{X_{\mu}} \quad (17)$$

то самовозбуждение происходит на определенном пределе скольжения, где  $R_r'$  зависит от сопротивления в роторе. Если реализуем выражение (16) согласно относительного предела скольжения  $S_a$

$$S_{as1} = \frac{\pm R_r'}{X_{\mu} \sqrt{K_r^2 - \left( 1 + \frac{X_r'}{X_{\mu}} \right)^2}} \quad (18)$$

Отсюда видно, что обороты двигателя от 0  $\omega_s = -S_{as} \omega_{on}$ .

Если при ее изменении в диапазоне условие самовоздействия не выполняется, то механическая характеристика двигателя падает на оси ординат и становится  $M = 0$ .

При воздействии на двигатель его крутящий момент быстро увеличивается, приближаясь к крутящему моменту  $M_{cm}$ .

Здесь необходимо использовать характеристику, зависящую от тока намагничивания  $E \text{ Iehq}$ . При любом значении  $M_{cm}$  и  $S_a = S_{as}$  условие будет выполнено.

$$X_{\mu} = X_{\mu man} = \text{const}$$

Таким образом, механическая характеристика электрического переноса в линейной характеристике намагничности  $\omega = \omega_s = \text{const}$  выражается уравнением.

С учетом того, что механические характеристики электропередачи составляют примерно

$$M = \frac{2M_{kr}}{S_a/S_{akr} + S_{akr}/S_a}, \quad (19)$$

то

$$M_{kr} = \frac{3E_{1mak}^2}{2\omega_{on} X_2'}; \quad S_{akr} = \frac{R_r'}{X_2'}$$

где  $\omega_{on}$  – номинальное значение угловой частоты, механическая характеристика, соответствующая выражению (19);  $M_{kr}$  – критический момент,  $S_{akr}$  – критическое скольжение, представленное в формуле 19

$$I_{\mu} = I_{\mu n}, \quad X_{\mu} = X_{\mu n}, \quad E_1 = E_{1n} \approx U_{\Phi n},$$

когда механическая характеристика в области насыщения. Отсюда

$\omega_{s1} = -S_{as1}/\omega_{on}$  определяются точки  $M_{s1}$ .

Если учесть сказанное выше в формулах (18) и (19).

$$S_{as1} = \frac{\pm R_r'}{X_{\mu n} \sqrt{K_r^2 - \left( 1 + \frac{X_r'}{X_{\mu n}} \right)^2}}; \quad (20)$$

$$M_{s1} = \frac{3U_{\Phi n}^2}{\omega_{on} X_r' \left( S_{as1} / S_{ackr} + S_{ackr} / S_{acs1} \right)} \quad (21)$$

## Заключение

1. Проведен тщательный технологический анализ операций кран-

манипулятора и механосборочного цеха, позволяющий определить сложность спе-

цифики работы кран-манипулятора в соответствии с торможением кран-манипулятора, его грузоподъемности и других энергетических и технических параметров кран-манипулятора.

2. Увеличение сопротивления  $\omega_s$  двигателя в цепи ротора  $R_r'$  приводит  $\omega_{s1}$  к увеличению выражений (19), (20) и (21) и увеличивает критический сдвиг  $S_{akr}$ . Приведенные выше выражения (19), (20) и (21) позволяют получить механические характеристики электрической передачи с необходимой точностью.

3. Для двигателя кран-манипулятора механосборочного гибкого производственного участка принято  $X_{\mu mak} = 1,5 \cdot X_{\mu n}$  так и  $E_{1mak} = 1,2 \cdot U_{\Phi n}$

. Из формулы (16) видно, что самовозбуждение сильно зависит от настройки параметров двигателей. Один из двигателей  $k_{ш} = 0,85 \div 0,92$  хорошо влияет на значения, а на другом не влияет на рабочем интервале скорости кран-манипулятора даже при  $k_{ш} = 1$ . Поэтому для получения требуемой характеристики отпускания нагрузки в режиме торможения, кроме схемы с собственным воздействием, в схему включают дополнительную цепь, на которую независимо влияет сеть переменного напряжения. Если условие выполняется при значениях  $k_{ш} = 0,85 \div 0,92$ , то ток самовозбуждения составляет 25 % от номинального тока двигателя, что повышает надежность самовозбуждения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грундиг, К.Г. Проектирование промышленных предприятий: Принципы. Методы. Практика / Клаус-Гарольд Грундиг; Пер. с нем. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 340 с.
2. Романенко, В. И. Проектирование механосборочных участков и цехов: пособие для студентов специальности 1-36 01 01 «Технология машиностроения» / В. И. Романенко, Ю. Ю. Ярмак; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Технология машиностроения». – Минск: БНТУ, 2022. – 57 с.
3. J. Mammadov, I. Aliyev, G. Huseynova, G. Orujova Algorithmic support for the management of the computer-aided design of flexible manufacture system and its equipment. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021, V 57, p. 959-958.
4. J.F. Mammadov, K.S. Abdullaev, U.H. Agaev, I.R. Aliev, G.G. Huseynova. Searching and Selection of a Flexible Manufacturing System by Means of Frame Model. *Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control*, p.139-152.
5. Бакунина Т. А., Тимофеева Е. В. Проектирование механосборочных цехов: Учебное пособие. – Рыбинск: РГАТА имени П. А. Соловьева, 2011.–154 с.

6. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for analysing hydraulic articulating crane dynamics, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.3, pp. 24-31.
7. Lagerev I.A., Milto A.A., Lagerev A.V. Effectiveness of elastic damping in the pivot joints of cargo boom of crane-manipulating installations at large gaps, *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.1, pp. 18-36.
8. Lagerev I.A., Lagerev A.V. Optimalnoe proektirovanie podyemno-transportnykh mashin [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiiy Universitet, 2013. – 228 p.
9. Osipov O.I., Nazhivin A.E. Electromechanical Complex for Test of Power Transmission of Helicopters. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Omsk, 21-23 may 2015, pp. 12-15.
10. Rahul Tiwari, Dr. A.K. Bhardwaj. Analysis of Induction Motor with die cast rotor. *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering*. Vol. 2, iss. 6, June 2014, pp. 1552-1558.

## REFERENCES

1. Grundig KG. Design of industrial enterprises: Principles. Methods. Practice. Moscow: Alpina Business Books; 2007.
2. Romanenko VI, Yarmak YuYu. Design of mechanical assembly sites and workshops: a manual for students of specialty 1-36 01 01 Technology of Mechanical Engineering. Minsk: BNTU; 2022.

3. Mammadov J, Aliyev I, Huseynova G, Orujova G. Algorithmic support for the management of the computer-aided design of flexible manufacture system and its equipment. *Cybernetics and systems analysis*. 2021;57: 959-958.
4. Mammadov JF, Abdullaev KS, Agaev UH, Aliev IR, Huseynova GG. Searching and selection of a flexible manufacturing system by means of frame

- model. Cyber-physical systems: modelling and intelligent control. p.139-152.
5. Bakunina TA, Timofeeva EV. Design of mechanical assembly shops: textbook. Rybinsk: RGATA named after P. A. Solovyov; 2011.
  6. Lagerev AV, Lagerev IA, Milto AA. Universal technique for analysing hydraulic articulating crane dynamics, Bulletin of Bryansk State Technical University. 2013;3:24-31.
  7. Lagerev IA, Milto AA, Lagerev AV. Effectiveness of elastic damping in the pivot joints of cargo boom of crane-manipulating installations at large gaps. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016;1:18-36.

8. Lagerev IA, Lagerev A.V. Optimal design of lifting-transport machines. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2013:228.
9. Osipov OI, Nazhivin AE. Electromechanical complex for test of power transmission of helicopters. 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), May 21-23, 2015; Omsk: 2015. p. 12-15.
10. Rahul Tiwari, Bhardwaj AK. Analysis of induction motor with die cast rotor. International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering. 2014;2(6):1552-1558..

#### Информация об авторах:

**Алиев Илгар Рафаель оглу** – докторант, ассистент Азербайджанского государственного нефтяного индустриального университета.

**Мамедов Джаваншир Фирудин оглу** – доктор технических наук профессор Сумгаитского государственного университета, зав. каф. «Автоматика и управление», линк Google Scholar –

**Aliev Ilgar Rafael oglu** – Doctoral student, assistant of Azerbaijan State Oil and Industry University.

**Mamedov Javanshir Firudin oglu** – Doctor of Technical Sciences Professor of Sumgayit State University, Head of the Department of Automation and Management; link Google Scholar - <https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=DhgBVekAAAAJ>

[https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=DhgBVekAAAAJ&view\\_op=list\\_works&authuser=1&sortby=pubdate](https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=DhgBVekAAAAJ&view_op=list_works&authuser=1&sortby=pubdate), тел. +994706644009.

**Абдуллаев Гурбан Садых оглу** – кандидат технических наук, доцент Сумгаитского государственного университета, каф. «Механика и технология транспортирования».

**VekAAAAJ&view\_op=list\_works&authuser=1&sortby=pubdate**, phone: +994706644009.

**Abdullaev Kurban Sadikh oglu** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Sumgayit State University, Department of Mechanics and Technology of Transportation.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**

**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 13.03.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 26.05.2023. Рецензент – Шалыгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 13.03.2023; approved after review on 15.05.2023; accepted for publication on 26.05.2023. The reviewer is Shaligin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**