

**Дружинин В. А., Азимов Х. Х., Андрианов И. К., Колесник М. Б., Иванов С. Н.**  
**V. A. Druzhinin, Kh. Kh. Azimov, I. K. Andrianov, M. B. Kolesnik, S. N. Ivanov**

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РЕЗКОПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ**

### **DEVELOPMENT OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH HIGHLY VARIABLE LOAD**

**Дружинин Владимир Александрович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: drujinin.volodya@mail.ru.

**Vladimir A. Druzhinin** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: drujinin.volodya@mail.ru.

**Азимов Хурсандмурод Хакимович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: керару@knastu.ru.

**Khursandmurod Kh. Azimov** – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: керару@knastu.ru.

**Андрианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Колесник Максим Борисович** – аспирант кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Maxim B. Kolesnik** – Postgraduate Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Engineering, Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены актуальность разработки электромеханической системы льдоудаления и её преимущества перед существующими способами уборки наледи с крыши. Приведены структура системы и её принцип действия. Предложена методика расчёта надёжности нагружаемого элемента системы. Рассмотрен принцип распознавания появления критического состояния и принятия решения о его устранении. Приведена методика выбора типа и мощности электродвигателя, а также оценки основного силового элемента системы.

**Summary.** The relevance of the development of an electromechanical ice removal system and its advantages over existing methods for removing ice from the roof are considered. The structure of the system and its principle of operation are given. A method for calculating the reliability of a loaded system element is proposed. The principle of recognizing the appearance of a critical condition and making a decision to eliminate it is considered. A methodology is given for selecting the type and power of the electric motor, as well as evaluating the main power element of the system.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, автоматизация, система распознавания, расчёт на надёжность.

**Key words:** electromechanical system, automation, recognition system, calculation of reliability.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00089, <https://rscf.ru/project/24-29-00089/>.*

УДК 621.313

**Введение.** Проектирование эффективных приводов для объектов различного целевого назначения требует учёта особенностей реализуемых с их использованием технологических процессов. Задача проектирования усложняется, когда создаются техническая система или комплекс, предназначенные для недетерминированных и/или резко изменяющихся условий эксплуатации. Определение количества и диапазонов варьирования проектных параметров может быть сделано на основе методов анализа процессных явлений, учитывающих энергетические преобразования в системе, включающей в общем случае приводной, передаточный, исполнительный, информационный и управляющий блоки. Алгоритм проектирования включает формальное описание технологического процесса (вектор выходных величин – перемещение объекта, изменение формы и т. п.), определение номенклатуры проектных параметров (вектор состояния, зависящий от типа блока, для приводного блока – сопротивления, напряжения, размерные соотношения, физические свойства материалов и т. д.), обоснование способа управления (вектор управления – напряжение, частота), учёт внешних и внутренних факторов (вектор возмущений – температура, вибрации и т. п.).

В настоящее время существуют различные способы борьбы с наледью:

- *Ручная уборка* является самым распространённым из всех способов. Такой способ связан с некоторыми рисками, например, такими как получение травмы или повреждение крыши инструментами.

- *Сбивание сосулек пневматическим оружием.* Этот способ уборки наледи применяется не так часто, как первый, т. к. считается опасным и для его использования требуется оцеплять территорию, чтобы не травмировать проходящих мимо людей.

- *Воздействие паром.* Заключается в удалении сосулек с помощью шланга и баллона, наполненного паром под давлением. Пар подтаивает сосульку, и она падает с крыши.

- *Установка антиобледенительных систем.* Данный способ набирает популярность, однако является достаточно дорогим. Основан на использовании греющего кабеля на крыше, который с помощью системы управления и датчиков регулирует свою температуру и тем самым нагревает снег, не позволяя сосулькам образоваться. В Даляньском технологическом университете разработана система удаления льда, основанная на использовании медных нанопроволок, которые получают энергию из солнечного света и не требуют питания от искусственного источника тока. Эффективно поглощая свет, они равномерно распределяют тепло по всему массиву. Опытным путём было установлено, что максимальный эффект достигается при размещении нанопроволок с зазором не более 2-3 мкм. При этом обеспечивается поглощение не менее 95 % падающего на поверхность света.

- *Специальные способы.* Более редко из-за своей стоимости встречаются способы удаления сосулек с помощью ультразвука, лазера или электрического импульса.

Перечисленные методы уборки наледи являются либо неудобными, т. к. требуют присутствия человека, либо несут некоторые риски, такие как получение травмы или повреждение крыши, а существующие автоматические системы, не имеющие этих недостатков, являются очень дорогими, поэтому предлагается электромеханическая система льдоудаления. Рассматриваемая электромеханическая система (ЭМС) позволяет обеспечить не только полную автоматизацию процесса льдоудаления и безопасность для инфраструктуры за счёт интеграции в комплексную систему безопасности, но и решает задачу энергосбережения. В статье рассматривается пример

разработки ЭМС с резкопеременной нагрузкой, образованной совокупностью элементов льдообразования, что характерно для большинства зданий и сооружений. Одной из наиболее актуальных проблем, постоянно привлекающих внимание различных исследователей, которая на первый взгляд может показаться незначительной, является образование сосулек на карнизах и водостоках крыш.

**Структурная схема электромеханической системы.** ЭМС обеспечивает удаление сосулек механическим способом с помощью элементов, которые перемещаются в реверсивном режиме вдоль крыши и разрушают образующуюся наледь.

Структурная схема ЭМС состоит из непосредственного электропривода возвратно-поступательного движения, информационно-измерительного блока, интегрированного в систему управления, и исполнительного механизма.

Для обоснованного выбора ЭМС нужно иметь представление о конкретных технологических требованиях, предъявляемых к механизму, который она будет приводить в действие. Установив эти требования, можно синтезировать субоптимальную ЭМС – ту, которая не только соответствует критериям производительности механизма, но и делает это наиболее экономичным и простым способом. Такой подход обеспечивает баланс между соблюдением производительности и эксплуатационной эффективностью проектируемой ЭМС.

**Моделирование технологического процесса.** Особенностью рассматриваемого процесса является предварительное обоснование размерных соотношений удаляемого объекта. В работе [1] показано, что безопасная сила удара для человека может быть принята на уровне до 160 Н, т. е. удар сосульки массой 0,1 кг, упавшей с высоты 10 м считается безопасным. Расчётная зависимость безопасной массы сосульки от высоты приведена на рис. 1.

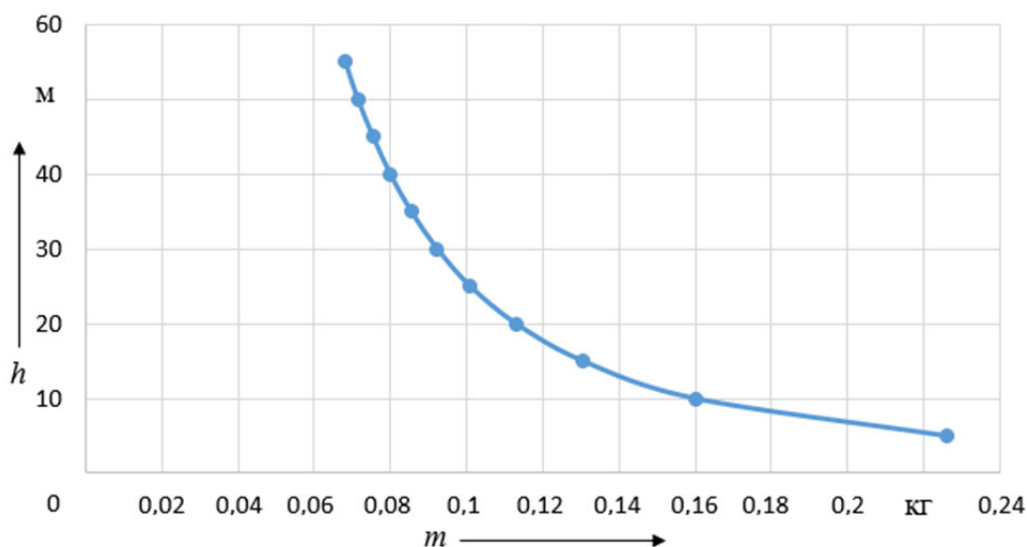


Рис. 1. Зависимость безопасной массы от высоты

В соответствии с приведённым выше алгоритмом для определения мощности приводного двигателя необходимо исследовать процесс удаления при вариации места приложения внешнего усилия.

На рис. 2 показана геометрическая модель единичного элемента, построенная с учётом рекомендации [1].

На рис. 3 показано интерактивное окно, в котором задаются свойства модели (материал – лёд). При моделировании варьируются величина и точка приложения силы. Результаты моделирования в пакете T-FLEX приведены ниже.

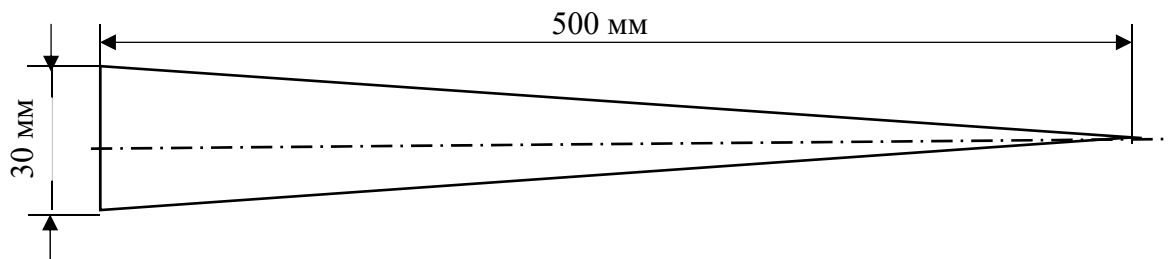


Рис. 2. Геометрическая модель

На рис. 4 к вершине единичного элемента приложена сосредоточенная сила, равная 3 Н.

На рис. 5 показаны значения коэффициента запаса по эквивалентным напряжениям. Коэффициент запаса прочности менее 1,0 соответствует разрушению материала.

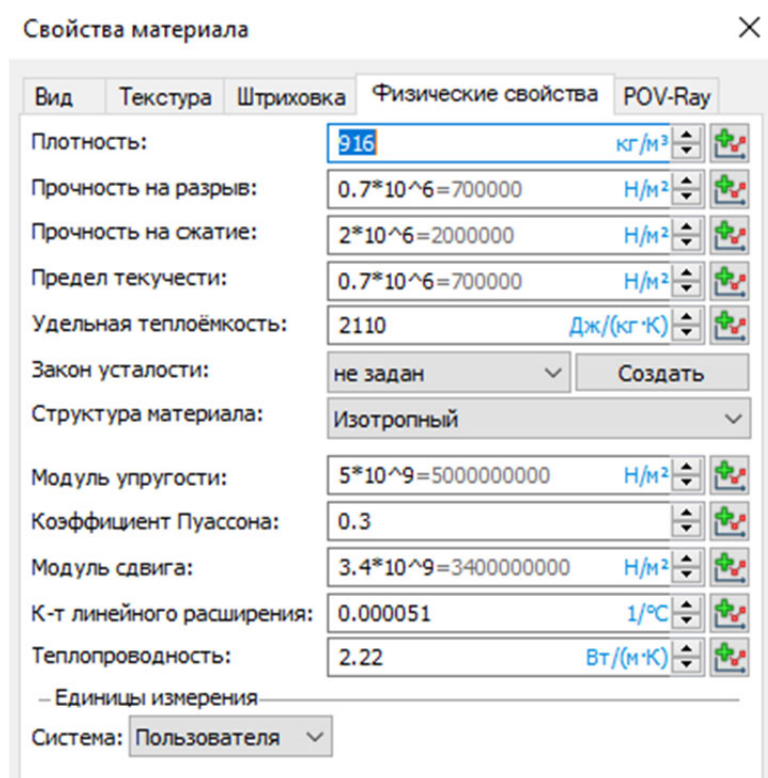


Рис. 3. Свойства модели

По результатам моделирования видно, что коэффициент запаса находится в диапазоне 0,7...1,26. Дальнейший анализ напряжённо-деформированного состояния показывает, что приложение силы к вершине позволяет удалить примерно только половину элемента, для удаления всего массива необходимо точку приложения усилия сместить к основанию. На рис. 6 приведены результаты моделирования при воздействии внешней силы величиной 20 Н, приложенной ниже основания единичного элемента.

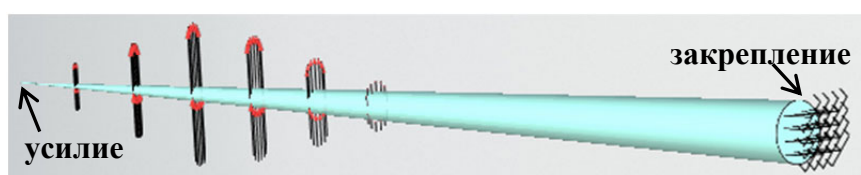


Рис. 4. Распределение напряжений при внешней силе 3 Н

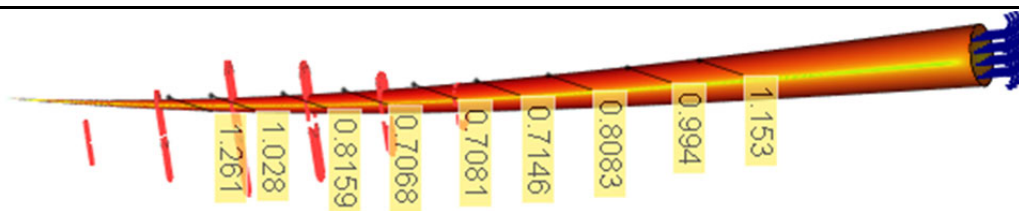


Рис. 5. Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям при внешней силе 3 Н

На следующем этапе моделирования решается вариационная задача обеспечения равномерности распределения нагрузки на исполнительный механизм, для чего определяются места расположения и, соответственно, количество двигателей, образующих ЭМС. В качестве исполнительного механизма выбирается пустотелый прямоугольник длиной 5 м (приближённое одностороннее расстояние между двумя смежными подъездами).

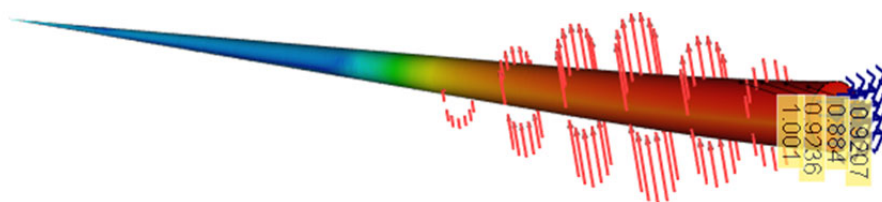


Рис. 6. Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям при внешней силе 20 Н

В качестве материала используется композитный материал с техническими характеристиками, приведёнными на рис. 7.

Для требуемого усилия 0,5 кН количество точек приложения варьируется от 3 до 7. В качестве примера на рис. 8 показаны величины напряжений для одного из вариантов.

Вид	Текстура	Штриховка	Физические свойства	POV-Ray
Плотность:			950	кг/м <sup>3</sup>
Прочность на разрыв:			20	Н/мм <sup>2</sup>
Прочность на сжатие:			20	Н/мм <sup>2</sup>
Предел текучести:			13	Н/мм <sup>2</sup>
Удельная теплоёмкость:			0	Дж/(кг·К)
Закон усталости:			не задан	Создать
Структура материала:			Изотропный	
Модуль упругости:			900	Н/мм <sup>2</sup>
Коэффициент Пуассона:			0.39	
Модуль сдвига:			320	Н/мм <sup>2</sup>
К-т линейного расширения:			0.00015	1/°C
Теплопроводность:			0.00021	Вт/(мм·К)
— Единицы измерения				
Система:	Пользователя			

Рис.7. Параметры материала исполнительного механизма

Задача\_1 [Экспресс-расчет]  
Напряжения эквивалентные, МПа

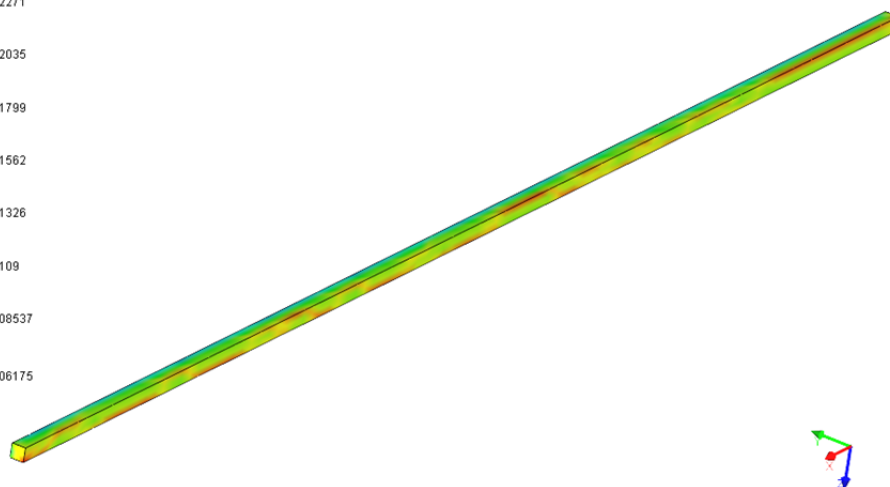
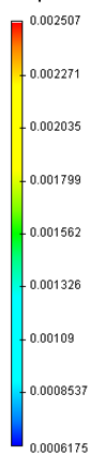


Рис. 8. Распределение напряжений при максимальном количестве точек приложения силы

**Выбор мощности привода.** Результаты моделирования позволяют определить необходимые усилия, количество и мощность электродвигателей, создающих усилие на исполнительном механизме, а также размерные соотношения электромеханической системы. Использование в качестве приводного устройства асинхронного электродвигателя связано с его надёжностью и технологичностью интеграции передачи «винт-гайка» в ротор двигателя. При выборе мощности двигателя учитывается вероятностный характер нагрузки, предположительно распределённой по нормальному закону, поэтому в качестве проектной величины задаётся среднее значение между усилием, необходимым для удаления сразу всех элементов льдообразования, и усилием, достаточным для удаления одиночного элемента.

Инновационный подход к оптимизации использования энергии и экономии ресурсов предполагает использование многофункционального привода. Благодаря интеграции нескольких основных функций эти устройства обеспечивают большую гибкость и эффективность в достижении целевых показателей производительности. При этом они соответствуют современным стандартам технологичности, электробезопасности, надёжности и экологичности.

Опираясь на выходные данные асинхронных электродвигателей серии 7AVE, можно объективно изучить их технические характеристики для подтверждения целесообразности применения такого типа привода. В табл. 1 представлены данные типовых двигателей, по мощности  $P_{2н}$  которых могут быть выбраны параметры исполнительного механизма (усилие  $F_p$  и линейная скорость  $v_l$ ).

Таблица 1

Расчётные характеристики комбинированного привода

$F_p$ , кН	$v_l$ , м/с	$P_{2н}$ , кВт	$F_p$ , кН	$v_l$ , м/с	$P_{2н}$ , кВт	$F_p$ , кН	$v_l$ , м/с	$P_{2н}$ , кВт
2p = 6			2p = 4			2p = 2		
42,6	0,04	4	400	0,02	8	220	0,02	4
132,53	0,083	11	210	0,06	12,5	150	0,08	12
239,13	0,092	22	160	0,1375	22	88	0,25	22
326,1	0,092	30	218,2	0,1375	30	120	0,25	30
370	0,1	37	269,1	0,1375	37	134,54	0,275	37
450	0,1	45	327,3	0,1375	45	163,64	0,275	45

Использование линейного электропривода позволяет эффективно решить две задачи:

1. обеспечить экономичный, надёжный и автоматизированный контроль тяги в широком диапазоне скоростей;
2. без изменения мощности и массы повысить использование приводной системы.

Основной целью исследования является определение тяговых характеристик привода с учётом числа полюсов и номинальной мощности базового асинхронного электродвигателя, т. к. способ решения первой задачи уже был предложен в [2–5].

Для решения поставленной задачи было применено выражение, связывающее активную мощность  $P$ , силу  $F_p$  (момент  $M_{вр}$ ) и линейную  $v_l$  (угловую  $w$ ) скорость:

$$P = F_p \cdot v_l = M_{вр} \cdot w.$$

Уникальность предлагаемого метода основана на использовании возможности электромеханического преобразователя самостоятельно переводить крутящий момент в силу тяги, обеспечивая линейное перемещение исполнительного механизма.

Функциональная схема непосредственного электропривода электромеханической системы приведена в [5]. В данном механизме конструктивно объединены электропривод и исполнительный механизм, поэтому нет необходимости в использовании дополнительного передаточного устройства, благодаря чему уменьшаются габариты и вес, а также увеличивается надёжность за счёт упрощения конструкции. Принцип действия основан на электромеханическом преобразовании энергии, как в обычном асинхронном двигателе, за исключением того, что на внутренней части короткозамкнутой вторичной обмотки имеется винтовая резьба, благодаря которой при вращении двигателя вал будет совершать линейные перемещения в зависимости от направления вращения двигателя.

Для исследования данного электропривода за основу взята модель обобщённого электромеханического преобразователя [6], дополненная для учёта особенностей привода модифицированным уравнением тяговой характеристики, полученной на основе [7]:

$$M_{вр} = 0,5F_p d_2 \left( \frac{D_{ср}}{d_2} f + \operatorname{tg}(\vartheta + \varphi) \right), \quad (1)$$

где  $M_{вр}$  – вращающий момент на валу;  $d_2$  – диаметр резьбовой части вала;  $D_{ср}$  – средний диаметр нарезанной части вращающегося ротора;  $f$  – коэффициент трения в резьбовом соединении;  $\vartheta$  – угол подъёма резьбы;  $\varphi = \operatorname{arctg} f_{пр}$ , здесь  $f_{пр}$  – приведённый коэффициент трения с учётом угла профиля передачи.

При заданных параметрах двигателя уравнение (1) позволяет определить тяговую характеристику электропривода.

На рис. 9 приведена структурная схема электромеханической системы льдоудаления с интегрированным блоком измерения и обработки информации, реализующая принципы, предложенные в [8].

Используемый метод идентификации обеспечивает формирование управляющего сигнала ЭМС, на первом этапе анализируются видеоданные, поступающие из контролируемой зоны. Этот метод основан на выделении кадра из видеопотока блоком получения кадра и параметров сцены 1. После обработки кадр передаётся подсистеме обработки кадров 2, которая выдаёт текстовое описание присутствующих на нём объектов вместе с их расположением. Далее полученная информация поступает в модуль нечёткой корректировки изображения 3 и на основе правил из корректирующей базы знаний 4, содержащей нечёткие правила реагирования на параметры сцены, генерирует параметры для фильтра модуля предварительной обработки 5. Затем модуль предварительной обработки 5 использует блок бинаризации 6 для преобразования изображения в чёрно-белое. Блок повышения контраста 7 обеспечивает контрастность изображения, блок шумоподавления 8, использующий адаптивные фильтры, убирает шумы, блок 9 переводит изображение в разные оттен-

ки серого. Далее обработанное изображение передаётся модулю обобщённой сегментации 10, где оно будет разделено на классы на основе семантических свойств.

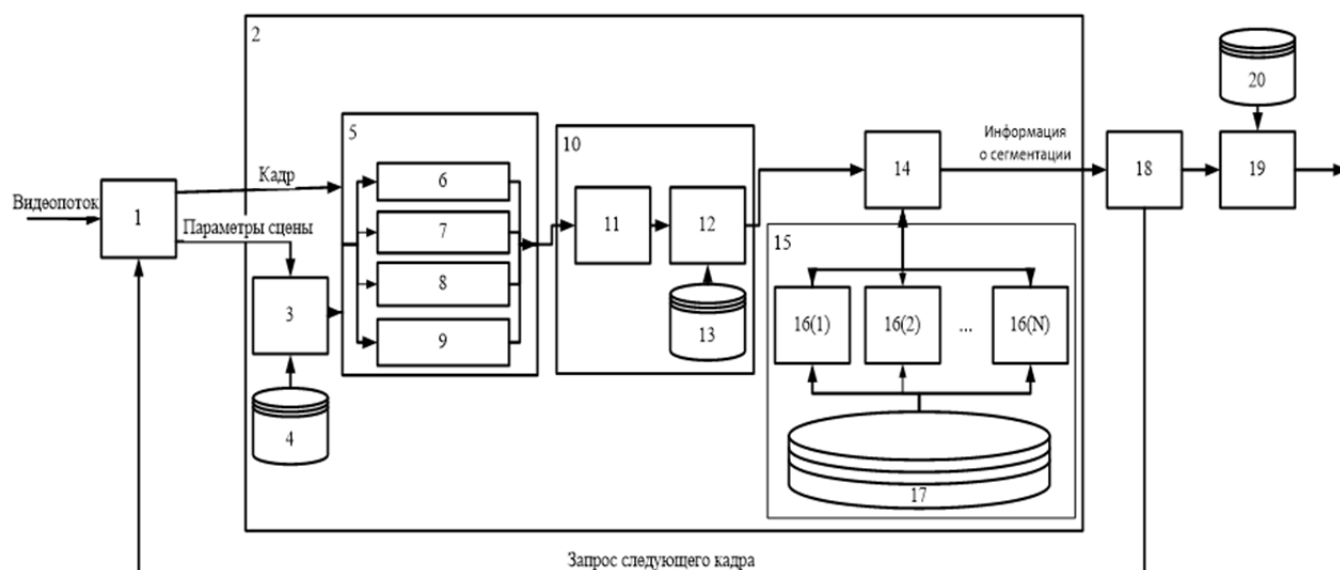


Рис. 9. Структурная схема системы управления

Модуль обобщённой сегментации использует сеть обобщённой сегментации 11 для проведения классификации путём сегментации изображения на дискретные группы пикселей или области, каждая из которых соответствует одному элементу. Сеть обобщённой классификации может быть создана с использованием свёрточных нейронных сетей или сетей классификаторов, которые обучены на множестве различных классов или используют метод сканирующего окна. Блок нечёткого обобщения 12 обобщает классы в более полные семантические группы. Обобщающая база знаний 13 содержит правила по созданию семантических группировок.

Сегментированное изображение подаётся в блок принятия решений о частной классификации 14, который принимает решение относительно передачи конкретных сегментов изображения в модуль частной классификации для улучшения результатов распознавания. Модуль частной классификации 15, включающий в себя множество конкретных алгоритмов-классификаторов, служит для уточнения результатов распознавания. Используя алгоритмы-классификаторы, модуль частной классификации через сеть частной классификации 16(1)...16(N) запрашивает из базы данных частной классификации 17 информацию для специальных алгоритмов-классификаторов.

На следующем этапе подсистеме агрегирования описаний кадров 18 предоставляются координаты и текстовое описание включённых в текущий кадр элементов. После обработки нескольких кадров, чтобы получить данные о том, что происходит в видеопотоке, собранные данные преобразуются в описание события.

Блок формирования команд управления 19, опираясь на базу данных команд управления 20 и предоставленное блоком 18 описание происходящего в видеопотоке, создаёт команду для электромеханической системы.

Более сложный вариант системы распознавания использован в субоптимальной энергетической системе [3]. На рис. 10 представлена структурная схема системы распознавания.

С учётом анализа существующих технических решений для рассматриваемой ЭМС предлагается структурная схема, приведённая на рис. 11.



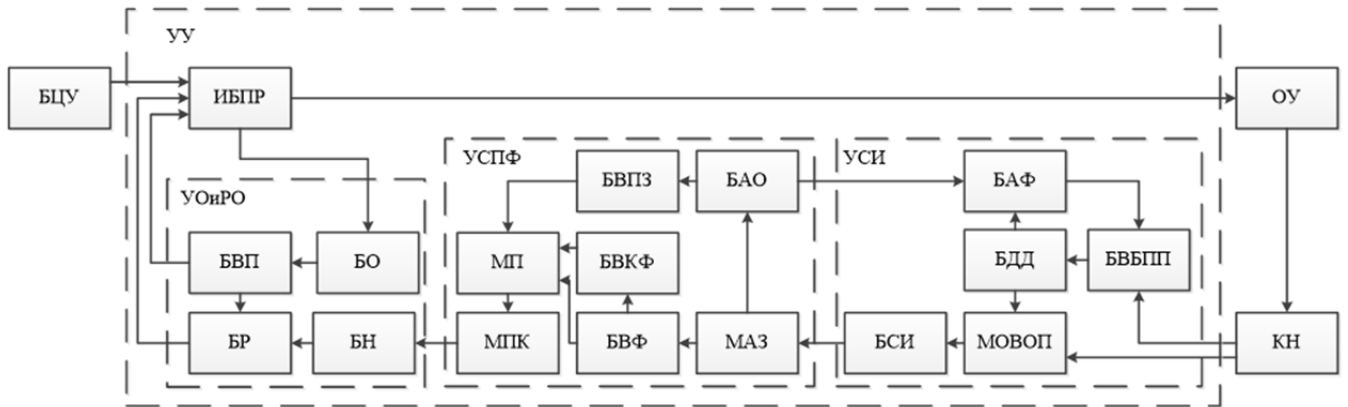


Рис. 10. Структурная схема системы распознавания

Для активации всей системы предполагается использовать комплексную систему охранного телевидения (СОТ), которая состоит из камер наблюдения (КН), а также может включать в себя датчики освещённости и другие. Данные с КН отправляются на устройство распознавания образов, которое состоит из блока нормализации (БН) и блока выбора признаков (БВП). Для анализа используется подсистема идентификации состояний объекта управления (ПИСОУ). Признаки, поступающие от БВП, классифицируются в блоке идентификации (БИ) путём сравнения с эталонами блока выбора эталонов (БВЭ). На интеллектуальный блок принятия решений (ИБПР) поступают данные от БВП и БИ, также учитывается целевое управление (ЦУ). При необходимости ИБПР может внести изменения в БВЭ, используя блок обучения (БО). ИБПР оказывает управляющее воздействие на ПЧ, который в свою очередь регулирует направление вращения электродвигателя. КН, входящая в СОТ, является источником информации для управления системой и занимается передачей видео с нужного нам участка крыши. Если в наблюдаемой сцене КН обнаружит наледь, то ИБПР передаст управляющий сигнал на ЭП.

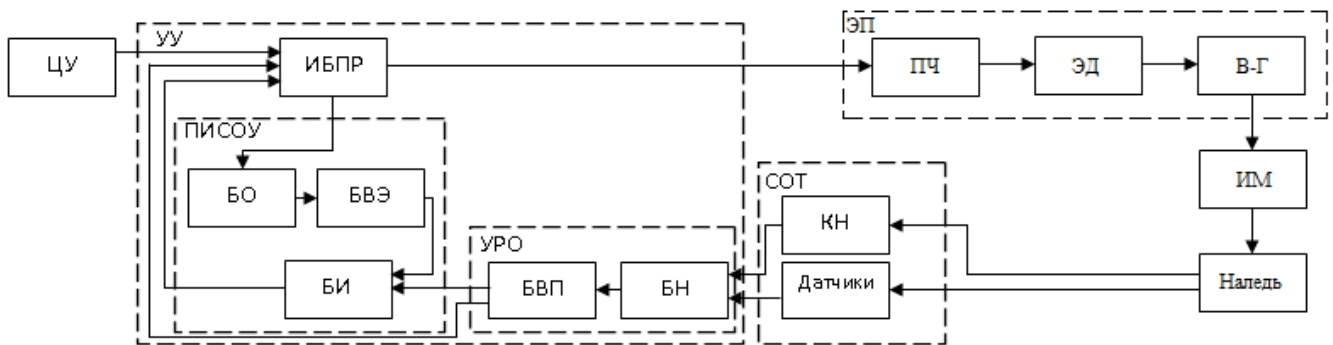


Рис. 11. Структурная схема электромеханической системы льдоудаления

Исполнительный механизм работает в режиме возвратно-поступательного перемещения. Поскольку нагрузка, прикладываемая к исполнительному механизму, приложена к валу двигателя, то вал принимается в качестве основного силового звена и рассчитывается на прочность.

Прочностной расчёт ведётся с учётом того, что, кроме основной знакопеременной нагрузки (осевой), действуют силы одностороннего магнитного тяжения, а также возмущения, вызванные нарушением балансировки и крутильными колебаниями [9; 10].

Пример расчёта на надёжность приведён для вала двигателя с учётом двух опасных сечений. Эти сечения имеют наименьший диаметр, а значит, и наименьший момент сопротивления при изгибе и кручении. В сечении «А» присутствует шпоночное соединение для передачи крутящего момента пропеллеру. В сечении «Б» выточена канавка для посадки подшипника на вал (см. рис. 12).

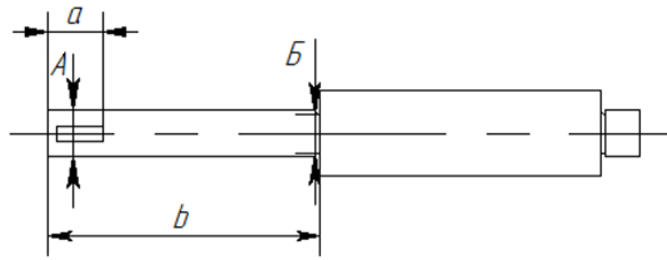


Рис. 12. Эскиз вала

Исходными данными для расчёта являются номинальный крутящий момент  $M_2$ , диаметры сечений  $d_A$  и  $d_B$ , масса подвижной части  $m_p$ .

Масса ротора  $m_p = 0,35$  кг.

Значение силы тяжести  $G_p$  определяется по формуле

$$G_p = 9,81 \cdot m_p.$$

Момент инерции вала  $J$  в сечениях «А», «Б»

$$J_A = \frac{\pi \cdot d_A^4}{64}, \quad J_B = \frac{\pi \cdot d_B^4}{64}.$$

Момент сопротивления при кручении в сечении «А»

$$W_{крА} = \frac{\pi d_A^3}{16} - \frac{bt(d_A - t)^2}{2d_A}.$$

Напряжение кручения для сечения «А», МПа,

$$\tau_a = k \frac{M_2}{W_{крА}},$$

где  $k$  – коэффициент перегрузки,  $k = 2 \dots 2,5$ .

Момент сопротивления при кручении в сечении «Б»

$$W_{крБ} = \frac{\pi d_B^3}{16}.$$

Напряжение кручения для сечения «Б»

$$\tau_B = k \frac{M_2}{W_{крБ}}.$$

Изгибающий момент в сечении «А»

$$M_{иА} = G_p \cdot a.$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении «А»

$$W_{иА} = \frac{\pi d_A^3}{32} - \frac{bt(d_A - t)^2}{2d_A}.$$

Напряжение изгиба в сечении «А»

$$\sigma_A = \frac{M_{иА}}{W_{иА}}.$$

Изгибающий момент в сечении «Б»

$$M_{иБ} = G_p \cdot b.$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении «Б»

$$W_{иБ} = \frac{\pi d_B^3}{32}.$$

Напряжение изгиба в сечении «Б»

$$\sigma_B = \frac{M_{иБ}}{W_{иБ}}.$$

Совместное действие изгиба и кручения в сечении «А»

$$\sigma_{прА} = \sqrt{\sigma_A^2 + 4(\alpha \cdot \tau_A)^2},$$

где  $\alpha = 0,8$  – коэффициент для возвратно-поступательного режима работы.

Совместное действие изгиба и кручения в сечении «Б»

$$\sigma_{прБ} = \sqrt{\sigma_B^2 + 4(\alpha \cdot \tau_B)^2}.$$

Напряжения изгиба и кручения позволяют определить коэффициент запаса – величину, указывающую на способность тяги выдерживать нагрузки, превышающие расчётные. Коэффициент запаса рассчитывается как отношение максимально допустимого напряжения к предельному напряжению, возникающему в критических сечениях. Допустимое значение напряжения не должно превышать 0,7 предела текучести материала, из которого изготовлены элементы исполнительного механизма.

Коэффициент запаса прочности в сечениях «А» и «Б»

$$k_{запА} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{прА}}, \quad k_{запБ} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{прБ}}.$$

Запасы прочности сравниваются с нормативным коэффициентом запаса  $n = 2,5$ :

$$k_{запА} > n, \quad k_{запБ} > n.$$

Если фактические коэффициенты запаса прочности в опасных сечениях больше нормативного, конструкция исполнительного механизма эксплуатируется без появления остаточных деформаций.

**Заключение.** Электромеханическая система льдоудаления, рассмотренная в статье, состоящая из информационно-управляющей системы, включающей в себя системы охранного телевидения и управляющее устройство, электропривод и исполнительный механизм, расширяет и дополняет существующие исследования в данной области [11–16]. Она позволяет создавать эффективные автоматические устройства для различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и жилищно-коммунального сектора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов, П. И. Анализ результатов численного моделирования черепно-мозговой травмы / П. И. Агапов // Процессы и методы обработки информации: сборник статей. – М.: МФТИ, 2005. – С. 186-193.
2. Патент № 2651531 С1 Российская Федерация, МПК7 В61L 29/04. Автоматизированная пропускная система: № 2017113804: заявлено 20.07.2017: опубликовано 19.04.2018 / Амосов О. С., Баена С. Г., Иванов Ю. С., Иванов С. Н.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 2 с.
3. Патент № 2626798 С1 Российская Федерация, МПК7 В61D 27/00, G05B 13/00, F24H 9/20, H04N 5/225, H04N 5/243. Субоптимальная энергетическая система: № 2016117431: заявлено 04.05.2016: опубликовано 01.08.2017 / Амосов О. С., Иванов С. Н., Иванов Ю. С., Баена С. Г., Со Хтайк; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – 2 с.

4. Kulinchenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulinchenko [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – P. 36-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
5. Ким, К. К. Моделирование комбинированного электропривода / К. К. Ким, С. Н. Иванов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 44-50.
6. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.
7. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высш. шк., 2008. – 408 с.
8. Ivanov, S. Automatic access to the premises of increased danger using intelligent electric drive / O. S. Amosov; S. G. Amosova, S. N. Ivanov // 4th IEEE International Conference on Applied System Invention (IEEE ICASI); Tokyo, JAPAN / APR 13-17, 2018 PROCEEDINGS OF 4TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SYSTEM INNOVATION 2018 ( IEEE ICASI 2018 ) P. 532-535. DOI: 10.1109/ICASI.2018.8394306.
9. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
10. Ким, К. К. Моделирование устойчивости электромеханического преобразователя при осевых нагрузках / К. К. Ким, М. Б. Колесник, С. Н. Иванов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2022. – Т. 65. – № 2. – С. 45-50.
11. Farzaneh, M. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh. – Canada: Springer, 2008. – 381 p.
12. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
13. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н. П. Шакина, И. А. Хоменко, А. Р. Иванова, Е. Н. Скриптунова // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2012. – № 348. – С. 1-27.
14. Бучинский, В. Е. Атлас обледенения проводов / В. Е. Бучинский; под ред. А. Д. Заморского. – 2-е изд., доп. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 116 с.
15. Алексеенко, С. В. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчётов / С. В. Алексеенко, А. А. Приходько // *Учёные записки ЦАГИ*. – 2013. – № 6 (XLIV). – С. 25-57.
16. Mishchenko, L. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets / L. Mishchenko, V. Hatton, V. Bahadur et al. // *American Chemical Society*. – 2010. – 4 (12). – P. 7699-7707. DOI: 10.1021/nn102557p.