УДК 621.313.3/ 62-831

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Уразов Ф.Ф., Поначевная С.А., Нещеретный Н.С.

Государственный морской университет имени адм. Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск,
e-mail: uf07211937@mail.ru, rusalsvetik@mail.ru

В статье представлены конструкции бестрансмиссионных электроприводов рабочих органов перегрузочных механизмов таких машин, как ленточные транспортёры, козловые, портальные и мостовые краны, судовые стрелы, барабанные мельницы. Приведена оценка экономической эффективности бестрансмиссионных электроприводов по сравнению с традиционно эксплуатируемыми. Проектная деятельность связывается в статье с интересами как производства, так и рынка. Модель может быть использована как основа для разработки частных методик, необходимых для решения задач, поставленных перед заказами промышленных предприятий. Целью исследования является анализ путей совершенствования автоматизированных электроприводов перегрузочных механизмов как наиболее применяемых в промышленном производстве и водном транспорте. За основной материал исследования были приняты всевозможные мировые патенты, включая авторские разработки. В результате исследования разработана одна универсальная конструкция электропривода, пригодная для спускоподъёмных и грузовых лебедок и стрел ленточных транспортеров, для катков портальных и мостовых кранов.

Ключевые слова: электрическая машина, электропривод, рабочий орган механизма, кран, мельница

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVES OF WORKING BODIES OF LOADING MECHANISMS

Urazov F.F., Ponachevnaya S.A., Nesheretnyy N.S.

State Maritime University named after F.F. Ushakov, Novorossiysk,
e-mail: uf07211937@mail.ru, rusalsvetik@mail.ru

The paper presents the design of electric without gear working bodies of reloading mechanisms of such machines as conveyors, gantry, portal and bridge cranes, ship boom, drum mills. The estimation of economic efficiency of electric without gear compared to traditionally exploit. Project activities associated with the interests of the article, both production and market. The model can be used as a basis for the development of individual techniques needed to solve the tasks of the industrial enterprises orders. The goal of the study is to analyze ways to improve the automated electric reloading mechanisms as the most used in industrial production and water transport. During the main study material various patents worldwide, including the author's development were adopted. The study developed a versatile actuator design suitable for lowering lifting and cargo winches and booms conveyor belts, Roller gantry and overhead cranes.

Keywords: electric machine, electric drive, the working body of the mechanism, the crane, the mill

Общей тенденцией развития современных электроприводов является их компьютеризация и применение электронной силовой преобразовательной техники. Однако преобразование самого силового элемента – рабочего органа механизма и его электродвигателя – стоит в стороне. Именно к этому относится представляемая работа.

Экономическим обоснованием разработки бестрансмиссионных электроприводов, в которых, по сравнению с обычно эксплуатируемыми, исключены промежуточные механические элементы (муфты, валы, редукторы, шкивы), являются следующие факторы: сокращаются расходы на конструкционные материалы изготовления электропривода и, соответственно, трудозатраты, экономятся затраты на расходные материалы, например, на смазочные масла, повышается в целом коэффициент полезного действия электропривода ввиду исключения потерь энергии на трение в промежуточных элементах и сокращения времени протекания динамических процессов (разгона, реверса, торможения) из-за уменьшения момента инерции движущихся масс электропривода.

Ввиду этого бестрансмиссионные электроприводы должны заменять существующие в первую очередь у общепромышленных механизмов, широко используемых на водном транспорте, в промышленном и гражданском строительстве.

Примером такого привода является авторский патент РФ № 2481690 «Электродвигатель рабочего органа перегрузочной машины системы прямого привода», для которого на рис. 1 представлен схематический разрез устройства в вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения

двигателя, на рис. 2 – разрез в вертикальной поперечной плоскости, перпендикулярной оси вращения.

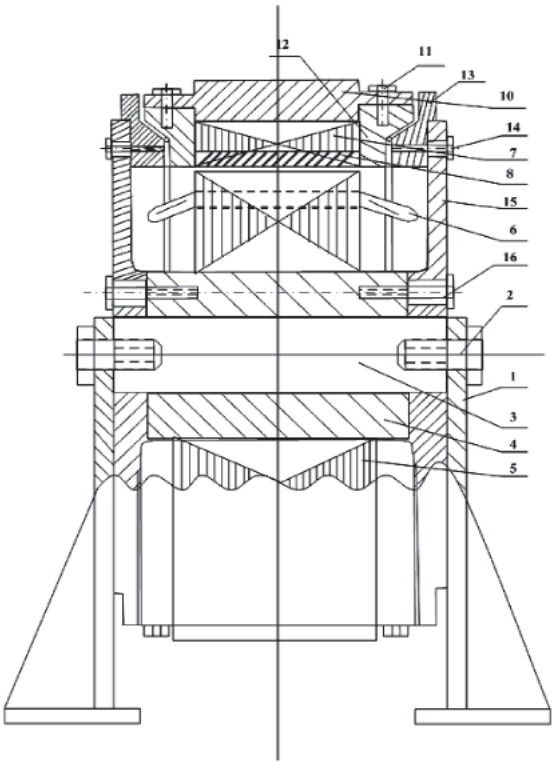

Рис. 1. Электродвигатель рабочего органа перегрузочной машины системы прямого привода:
1 – рама; 2, 11, 14, 16 – болты; 3 – вал; 4 – втулка; 5 – сердечник; 6 – обмотка статора; 7 – сердечник ротора; 8 – постоянные магниты; 9 – стержни; 10 – стальной корпус; 12 – подшипник; 13 – наружное кольцо подшипника; 15 – щит подшипника

Электродвигатель имеет стальную сварную опорную раму 1 жестко соединенную болтами 2 с опорным стальным валом 3, на который напрессована опорная стальная втулка 4. На втулку 4 напрессован шихтованный из листов электротехнической стали цилиндрический сердечник статора 5. Сердечник 5 снаружи вдоль окружности имеет пазы и зубцы, а в пазах размещены проводники трехфазной обмотки статора 6, питаемой напряжением стандартной промышленной частоты. Снаружи сердечника статора на расстоянии рабочего воздушного зазора δ по радиальному направлению размещен шихтованный из листов электротехнической стали сердечник ротора 7, имеющий углубления и пазы. В углублениях размещены постоянные магниты 8 из сплава Nd–Fe–B (неодим – железо – бор), а в пазах размещены стержни 9 из проводникового материала, которые с двух торцевых сторон замкнуты накоротко кольцами из того же материала. Снаружи на сердечник ротора напрессован стальной корпус 10, к которому болтами 11 крепится внутреннее кольцо 12 подшипника, вращающееся вместе с ротором. Наружное кольцо 13 подшипника болтами 14 крепится к внутренней стороне подшипникового щита 15, который в свою очередь болтами 16 крепится к опорной втулке 4.

На фигуре 1 и фигуре 2 опорная рама 1 показана в положении, когда двигатель работает как привод барабана, который охвачен или тросом грузовой спускоподъёмной лебедки, или лентой транспортера. В случае, когда двигатель работает как привод катка тележки или моста крана, положение опорной рамы меняется на 180° против изображенного и обе части опорной рамы соединяются общей опорной плитой, на которую опирается конструкция тележки или моста крана.

Вторым примером бестрансмиссионного электропривода является авторский патент РФ № 2417505 «Электродвигатель горнорудной мельницы системы прямого привода», продольный и поперечный разрезы которого представлены на рис. 3 и 4.

Электродвигатель имеет сварную станину 1 с кольцевым ферромагнитным зубчатым шихтованным сердечником 2, в пазы которого уложена трехфазная обмотка 3, питаемая напряжением стандартной промышленной частоты, и внутри сердечника 2 размещен ротор в виде стального цилиндрического корпуса 4 трубной мельницы, с наружной стороны которого в углублениях на длине сердечника статора размещены сегменты постоянных магнитов 5 радиальной намагниченности, между которыми установлены проводящие стержни короткозамкнутой обмотки 6, а с внутренней стороны винтами 7 к корпусу 4 через эластичные амортизаторы 8 на той же длине крепятся стальные бронеплиты 9 по всему периметру окружности внутреннего диаметра корпуса мельницы, загруженной мелющими телами 10 (например, шары) и размалываемым материалом, например на цементных заводах известняк при мокром помоле или клинкер при сухом.

Следует подчеркнуть, что во всех приведенных конструкциях в качестве источников возбуждения применены высокоэффективные постоянные магниты из сплава Nol–Fe–B [8]. Кроме этого для электроприводов, не регулируемых по скорости в электродвигателях, реализуют принцип электрической редукции за счет правильного выбора соотношения числа полюсов ротора и зубцов сердечника статора.

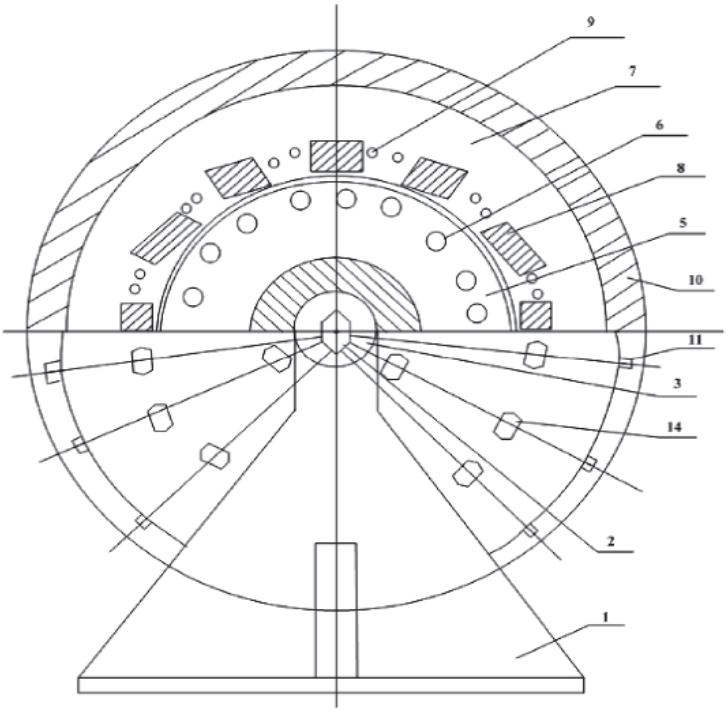

Рис. 2. Электродвигатель рабочего органа перегрузочной машины системы прямого привода: 1 – рама; 2, 11, 14, 16 – болты; 3 – вал; 4 – втулка; 5 – сердечник; 6 – обмотка статора; 7 – сердечник ротора; 8 – постоянные магниты; 9 – стержни; 10 – стальной корпус; 12 – подшипник; 13 – наружное кольцо подшипника; 15 – щит подшипника

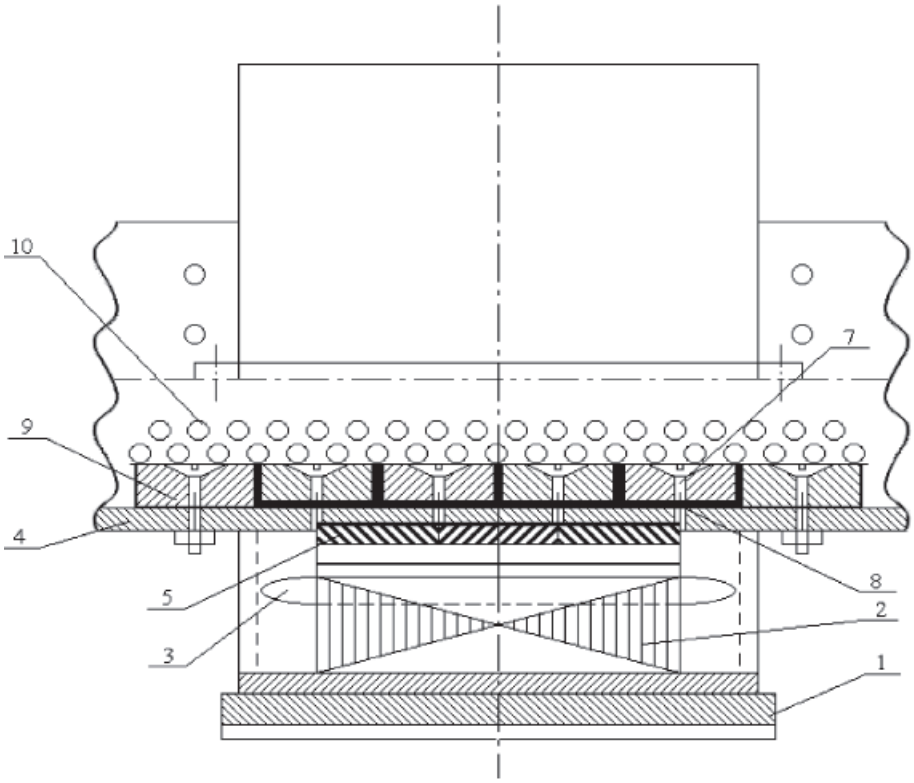

Рис. 3. Электродвигатель горнорудной мельницы системы прямого привода: 1 – сварная станина; 2 – сердечник статора; 3 – трехфазная обмотка; 4 – корпус мельницы; 5 – постоянные магниты; 6 – стержни короткозамкнутой обмотки; 7 – винты; 8 – эластичные амортизаторы; 9 – стальные бронеплиты; 10 – мелющие тела

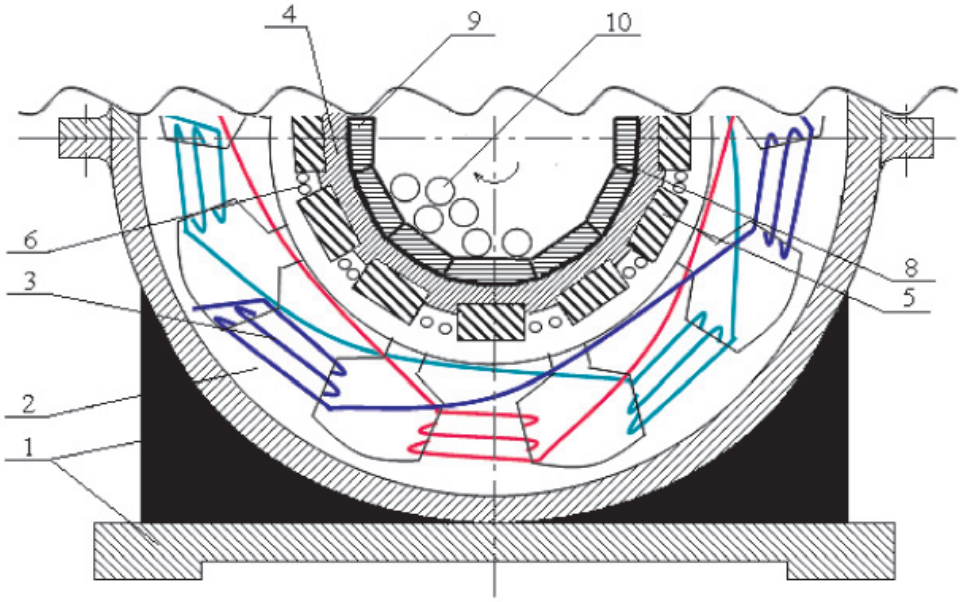

Рис. 4. Электродвигатель горнорудной мельницы системы прямого привода:
1 – сварная станина; 2 – сердечник статора; 3 – трехфазная обмотка; 4 – корпус мельницы;
5 – постоянные магниты; 6 – стержни короткозамкнутой обмотки; 7 – винты; 8 – эластичные амортизаторы; 9 – стальные бронеплиты; 10 – мелющие тела

Установившаяся скорость (частота) вращения ротора n электрической машины [1] связана с частотой f напряжения питания обмотки статора, числом пар полюсов p от постоянных магнитов ротора и числом зубцов сердечника статора z_1 известным соотношением [5]:

$$n = \frac{50f}{p} \cdot \frac{z_2 - z_1}{z_2}, \qquad (1)$$

где $z_2 = 2p$.

Следовательно, для получения рабочей скорости вращения мельницы, например, порядка 20 об/мин, необходимо при $f = 50$ Гц, $2p = 24$ иметь $z_1 = 22$, что обусловит скорость

$$n = \frac{60 \cdot 50}{12} \cdot \frac{24-22}{24} = 20{,}83 \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

то есть электрическую редукцию

$$i_э = \frac{z_2}{z_2 - z_1} = \frac{24}{24-22} = 12.$$

Для получения монтажной скорости вращения мельницы отключением обмотки статора основного электродвигателя останавливают вращение мельницы в свободном выбеге и вновь запускают ее подачей напряжения питания на обмотку статора вспомогательного электродвигателя меньшей мощности по конструкции полностью аналогичного основному электродвигателю, но имеющего другие значения $2p$ и z_1 [6]. Например, при $f = 50$ Гц, $2p = 144$, $z_1 = 140$ получается число оборотов

$$n = \frac{60 \cdot 50}{72} \cdot \frac{144-140}{144} = 1{,}16 \text{ об/мин},$$

то есть при значении величины электрической редукции, равной

$$i_э = \frac{z_2}{z_2 - z_1} = \frac{144}{144-140} = 36.$$

Возможен вариант без применения вспомогательного двигателя, но с использованием преобразователя частоты подключенного к сети частоты 50 Гц и питающего обмотку статора на частоте 5 Гц.

При снижении материалоемкости и сокращении эксплуатационных расходов предлагаем устройство, которое в реализации приведет, по оценке авторов, к повышению энергетической эффективности примерно в 3,5 раза при значениях $\eta = 0{,}85 \cdot \cos\varphi = 0{,}85$.

Для большинства эксплуатируемых промышленных электроприводов в динамических процессах можно пренебречь электромагнитной частью переходного процесса и считать его чисто электромеханическим [2]. Тогда интегрированием уравнения равновесия моментов в динамике можно будет определить дополнительное время переходного процесса из-за наличия дополнительных движущихся масс для электроприводов [4], не имеющих бестрансмиссионного привода и соответственно, рассчитать дополнительные затраты электроэнергии.

Оценка влияния полных инерционных масс электропривода на продолжительность времени переходных процессов состоит в следующем. Время любого переходного процесса определяется путем решения системы уравнений. Для коллекторной машины постоянного тока с электромагнитным возбуждением [3] или с таковым синхронной машины или асинхронной машины система уравнений всегда имеет три уравнения, а именно: два уравнения равновесия напряжений по цепям двух обмоток и одного уравнения равновесия моментов на валу машины. В простых, часто встречающихся случаях, когда переходный процесс идет с неизменным током цепи возбуждения, система уравнений упрощается до двух уравнений – одного равновесия напряжений по цепи обмотки якоря и второго равновесия моментов на валу машины. В этом случае при двух искомых неизвестных переменных – токе цепи якоря $i_a(t)$ и угловой скорости вращения якоря $\omega(t)$ решение всегда представляется в виде суммы двух решений: одного как общего решения однородного уравнения (свободный режим) и второго как частного решения неоднородного уравнения (принужденный режим). Однако сам вид решения возможен в одном из трех вариантах, два из которых установившиеся и один неустановившийся. Последний получается, если действительные части комплексных корней характеристического уравнения будут положительными. Если корни будут комплексными, но с отрицательными вещественными частями, то процесс будет колебательным, но с получением установившегося режима. Если корни будут вещественными и отрицательными, то процесс будет установившимся экспоненциальным по характеру. Этот чаще всего встречающийся вариант получается, когда выполняется неравенство $T_{эм} > 4T_a$, где $T_{эм} = J_\Sigma \dfrac{R_{ад}}{C_м \Phi}$ есть электромеханическая постоянная времени, а $T_a = L_a/R_{ад}$ есть электромагнитная постоянная времени, где L_a и $R_{ад}$ есть индуктивность обмотки якоря и активное сопротивление цепи якоря.

Для этого случая считают, что можно пренебречь электромагнитной частью переходного процесса и считать его чисто электромеханическим.

Тогда для определения времени переходного процесса достаточно решить одно уравнение равновесия моментов на валу машины:

$$M_{эм}(\omega) - M_c(\omega) = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} \qquad (2)$$

в виде

$$t = \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} \frac{J_\Sigma}{M_{эм}(\omega) - M_c(\omega)} d\omega, \qquad (3)$$

где J_Σ – суммарный приведенный к валу электродвигателя момент инерции.

Если взять пример реостатного способа пуска в ход электродвигателя (ЭД) грузовой лебедки или тележки крана, или всего крана, и полагать, что:

– $m_г$, $m_б$ – массы груза и барабана лебедки;

– пуск (разгон) идет ступенями с числом k и на каждой ступени начальные и конечные скорости ЭД ω_i и ω_{i+1}; ϑ_k – линейные скорости перемещения массы механизма;

– между валом ЭД и валом рабочего органа механизма имеется редуктор с числом ступеней j и на каждой ступени имеется момент инерции вращающихся частей J_j;

– рабочий орган механизма (например, барабан лебедки) имеет скорость вращения $\omega_м$;

– линейная поступательная скорость перемещения массы $m_{мх}$ полезной части механизма, например груза или тележки с грузом, или всего крана с грузом есть $\vartheta_{мх}$, то приведенный к валу электродвигателя момент инерции будет равен

$$J_\Sigma = J_д + \sum_j \frac{J_j}{i_j^2} + \sum_k m_{мх} \rho_k^2, \qquad (4)$$

где $i_j = \omega_j/\omega_д$; $\rho_k = \vartheta_k/\omega_д$; $m_{мх} = m_г + m_б$ – для грузового барабана грузоподъемной лебедки; $m_{мх} = m_г + m_т$ – для тележки крана с грузом; $m_{мх} = m_г + m_k$ – для крана с грузом; $m_{мх} = m_г + m_с$ – для грузовой стрелы с грузом.

Имеются для каждого вида электродвигателя свои зависимости $M_{эм}(\omega)$ и для каждого вида механизма имеются свои зависимости статического момента $M_с(\omega)$ от скорости ω.

В частных случаях имеем:

– для механизма подъема, спуска груза $M_c(\omega) = \text{const}$;

– для механизма наматывающего устройства $M_c(\omega) = \text{const}/\omega$;

– для механизма вентилятора или центробежного нагнетателя

$$M_c(\omega) = A + B\omega^2,$$

где A, B – константы.

Следует, что дополнительное время, необходимое для создания движения рабочего органа из-за наличия дополнительных инерционных масс (валов, муфт, редукторов и прочего), составляет величину

$$t_{\text{доп}} = \sum_k \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} \left(\sum_j \frac{J_j}{i_{jc}^2} \right) \frac{d\omega}{M_{\text{эм}}(\omega) - M\ (\omega)}. \quad (5)$$

Заключение

Предложенные конструкции бестрансмиссионных электроприводов широкого класса перегрузочных механизмов машин и водного транспорта позволят весьма и весьма существенно сократить расходы материалов на изготовление, электроэнергию и масла при эксплуатации, а также трудозатраты [7].

Список литературы

1. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для студентов втузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

2. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода: учебник для вузов. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 496 с.

3. Кучинский В.Г. Сравнительные оценки гребных вентильных двигателей традиционного исполнения и машин с поперечным магнитным потоком // Электричество. – 2004. – № 7. – С. 39-41.

4. Москаленко В.В. Электрический привод – 2-е изд. – М.: Академия 2007. – 368 с.

5. Electric Ring Thrusters. ALSTOM Schilling Robotics 201 Cousteau Place, Davis, California 95616-5412 USA.

6. JOHN Holt, Developing a high efficiency Institution. Inc.5600 U.S. 1 North, Ft Pierce, Florida 34946.

7. Quest electric ring thrusters. ALSTOM Schilling Robotics 201 Cousteau Place, Davis, California 95616-5412 USA.

8. Rosu M., Nahkuri V., Arkkio A., Jokinen T., Mantere J., Westerlund J. Permanent magnet synchronous motor for ship propulsion drive. Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, P.O. Box 3000, FIN-02015 HUT, FINLAND. ABB Industry Oy, Synchronous Machines, P.O.BOX 18Б FIN-00381 Helsinki FINLAND.