

УДК 621.313.29:692.66

**А.А. Бойко, д-р техн. наук,
А.Ф. Винаков, к.т.н.,
В.В. Булгар, к.т.н.,
А.А. Бесараб**

ТИХОХОДНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ БИИНДУКТОРНОГО ТИПА В БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ЛИФТОВЫХ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация. Произведен технический анализ требований, предъявляемых к приводным двигателям и канатоведущим шкивам безредукторных лифтовых лебедок. Рассмотрен ряд применяемых технических решений, которые значительно облегчают требования к минимальной скорости канатоведущего шкива. Рассмотрена возможность применения тихоходного электрического двигателя бииндукторного типа с безобмоточным цилиндрическим ротором. Описаны особенности конструкции инновационного двигателя и основные эксплуатационные показатели. Обозначены основные преимущества предлагаемого безредукторного лифтового электропривода.

Ключевые слова: лифт, электропривод, подъемный механизм, лебедка безредукторный электропривод, двигатель бииндукторного типа, безобмоточный ротор, цилиндрический ротор.

**А.О. Бойко, д-р техн. наук,
О.Ф. Винаков, к.т.н.,
В.В. Булгар, к.т.н.,
А.О. Бесараб**

ТИХОХІДНИЙ ДВИГУН БІІНДУКТОРНОГО ТИПУ У БЕЗРЕДУКТОРНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ЛІФТОВИХ ПІДЙОМНИХ МЕХАНІЗМІВ

Анотація. Зроблений технічний аналіз вимог, які пред'являють до приводних двигунів і канатоведучих шківів безредукторних ліфтових лебідок. Розглянутий ряд вживаних технічних рішень, які значно полегшують вимоги до мінімальної швидкості канатоведучого шкива. Розглянута можливість застосування тихохідного електричного двигуна бііндукторного типу з безобмоточним циліндричним ротором. Описані особливості конструкції інноваційного двигуна і основні експлуатаційні показники. Позначені основні переваги пропонованого безредукторного ліфтового електроприводу.

Ключові слова: ліфт, електропривод, підйомний механізм, лебідка, безредукторний електропривод, двигун бііндукторного типу, безобмоточний ротор, циліндричний ротор.

**A. A. Boyko, Sc.D.,
A. Vinakov, Ph.D.,
V. Bulgar, Ph.D.,
A. Besarab**

SLOW-SPEED MOTOR OF BIINDUCTOR TYPE IN GEARLESS ELECTRIC DRIVE OF ELEVATING MECHANISMS

Abstract. The technical analysis of the requirements produced to the drive engines and rope-driving pulleys of direct-drive elevator winches is produced. The row of the applied technical decisions that considerably facilitate requirements to minimum speed of rope-driving pulley is considered. Possibility of application of slow electric engine of double inductor type is considered with inert a cylindrical rotor. The features of construction of innovative engine and basic operating indexes are described. Basic advantages of the offered gearless electric elevator drive mark.

Keywords: elevator, electromechanic, lifting mechanism, winch, gearless electric drive, engine of double inductor type, inert rotor, cylindrical rotor.

Введение. Одним из актуальных и современных направлений развития лифтовых электроприводов, является переход от редукторных конструкций к безредукторным, а также применение регулируемых электро-

приводов. В этом направлении, с переменным успехом, на сегодняшний день, работают практически все исследователи и мировые разработчики [1, 2]. В безредукторных лифтовых лебедках канатоведущий шкив

(КВШ) устанавливается непосредственно на вал приводного двигателя. Таким образом, уменьшаются размеры лебедки, и она становится более компактной, чем ее предшественники, что так же упрощает ее расположение в лифтовой шахте. За счет изъятия из электромеханической системы редуктора, КПД такой лебедки выше аналогов, соотношение массы груза и других движущихся масс распределено в пользу груза, появляется возможность рекуперации значительных величин энергии в сеть.

Целью работы являются – анализ условий применения приводных двигателей в безредукторных лифтовых электроприводах и обоснование применения низкоскоростного двигателя бииндукторного типа с безобмоточным цилиндрическим ротором.

Материал исследования. Серьезной проблемой при синтезе безредукторных лифтовых лебедок новых типов продолжает оставаться необходимость наличия соответствующих по параметрам приводных двига-

телей [1,3]. Двигатель, сохраняя ту же мощность (или меньшую мощность, с учетом вычета мощности потерь в редукторе), должен быть тихоходным и развивать пропорционально увеличенный рабочий момент. Известно, что габариты электрической машины, ее масса и момент инерции ротора при равной мощности значительно зависят от номинальной скорости [4]. Изъятие из подъемного механизма редуктора, с передаточным числом i_p требует такого же уменьшения скорости двигателя и соответствующего увеличения момента, что показано в табл. 1. [4].

Машины переменного тока традиционной конструкции при этом должны иметь обмотку с большим числом полюсов, которое теоретически доходит до 150. В этом случае получение требуемого крутящего момента требует увеличения сечения магнитопровода. Габариты и масса тихоходного двигателя существенно увеличиваются [5].

Таблица 1 Зависимости скорости приводных двигателей лебедок от заданной скорости кабины и диаметра канатов

Параметр	Скорость 1 м/с			Скорость 1,6 м/с		
	8	10	12	8	10	12
Диаметр каната, мм	8	10	12	8	10	12
Минимально допустимый диаметр КВШ, мм	320	400	480	320	400	480
Угловая скорость двигателя, 1/с	6,25	5,0	4,16	10,0	8,0	6,66
Частота вращения двигателя, об/мин.	59	47,75	39,8	94,4	76,4	63,66
Число полюсов машины при частоте напряжения 50 Гц	102	126	150	64	78	94

Это объясняет ограниченность применения безредукторных лебедок с тихоходными асинхронными или коллекторными электрическими машинами. Производителями предлагаются технические решения, которые значительно облегчают требования к минимальной скорости канатопроводящего шкива и приводного двигателя. Однако большинство из этих решений можно признать неудовлетворительными, так [6]:

– увеличение кратности полиспада приводит к увеличению количества отводных блоков. Это усложняет монтаж лифта, увеличивает износ канатов, уменьшает КПД канатной передачи, ограничивает высоту подъема кабины, приводит к неравномерному

натяжению канатов и к перекосам кабины, увеличивает нагрузку на направляющие, вызывая их износ и увеличение механических потерь;

– отказ от противовеса приводит к увеличению установленной мощности двигателя лебедки, даже в сравнении с мощностью традиционного двухскоростного асинхронного двигателя, для тех же условий;

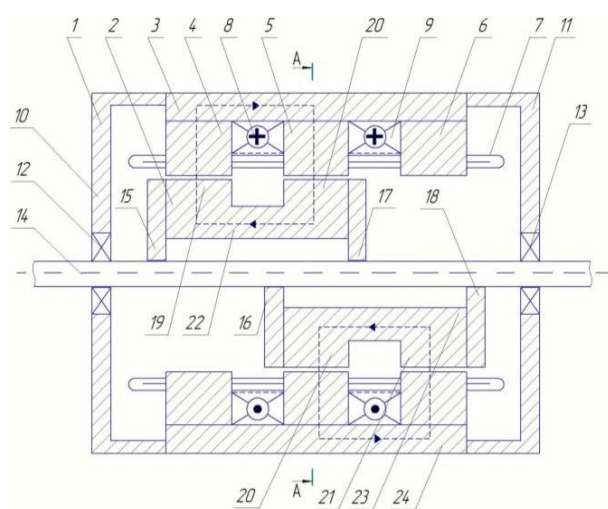
– увеличенная длина канатов при малом сечении приводит к влиянию их упругости на характер движения, что проявляется в колебаниях кабины и снижению точности остановки.

Относительно лифтов массового применения со сравнительно невысокими скоростями движения кабины (до 1- 1,6 м/с), решение проблемы возможно, прежде всего, за счет создания инновационных приводных машин специальных конструкций. Одна из таких машин - низкоскоростной электрический двигатель бииндукторного типа с безобмоточным цилиндрическим ротором (ЭДБТЦР), разработанный в Одесском национальном политехническом университете, в котором за счет нового исполнения магнитной системы статора удается обеспечить высокие энергетические и динамические показатели [7, 8]. Повышение процента использования активной поверхности статора решена при создании конструкции электрической машины бииндукторного типа с безобмоточным цилиндрическим ротором, которая содержит кольцевой корпус, в котором установлены три неподвижных статора с обмоткой якоря, две тороидальные обмотки возбуждения и общий ротор цилиндрического вида. Корпус электрической машины выполнен из ряда отдельных обочих для трех статоров магнитно не связанных ферромагнитных стержней-зубцов Ш-образной формы, которые закреплены в немагнитных торцевых щитах кольцевого корпуса и размещены симметрично относительно ферромагнитных полюсов цилиндрического ротора, конструктивно объединенных с валом с помощью немагнитных торцевых щитов ротора.

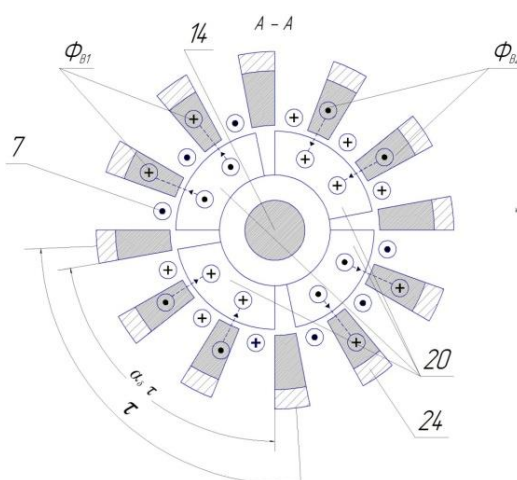
В данной цилиндрической электрической машине бииндуктиинного типа наличие статора с магнитно не связанными ферромагнитными элементами-зубцами обеспечивает возможность размещения двух обмоток возбуждения, каждая из которых и создает свой магнитный поток Φ_{B1} и Φ_{B2} . Эти магнитные потоки, имеющие встречно-параллельные направления, обеспечивают полное использование активной поверхности центрального статора и половинное использование активной поверхности крайних статоров в преобразовании энергии. Этим и обеспечивается увеличение удельных значений электромагнитной мощности и момента созданной ЭМДТЦР. В ЭМДТЦР нет массивного ферромагнитного сердечника ротора, что уменьшает массу вращающейся части

двигателя, и соответственно, повышает его быстродействие в переходных режимах [7].

Конструктивная схема ЭМДТЦР обеспечивает повышение удельных значений мощности и момента электрической машины, что особенно важно при пониженных номинальных частотах вращения. При этом значительно уменьшается трудоемкость его изготовления, соответственно, уменьшается себестоимость электрической машины.



а)



б)

Рис. 1 а) - Конструктивная схема ЭМДТЦР б) - сечение А-А

Электрическая машина бииндукторного типа с безобмоточным цилиндрическим ротором (рис. 2) содержит неподвижную часть 1, и вращающийся ротор 2. Неподвижная часть 1 содержит кольцевую структуру 3, на внутренней поверхности которой расположены три статора 4, 5, 6. В пазах статоров 4, 5, 6 уложены секции обмотки якоря 7, а в промежутках между статорами 4,5 и 5,6 – обмотки возбуждения 8, 9. С валом 14 жестко соединены торцевые щиты ротора 15, 16, 17, 18, обеспечивающие крепление ферромагнитных полюсов 19, 20, 21 цилиндрического ротора 2, которые отделены от статоров 4, 5, 6 рабочим воздушным зазором δ . В отличие от классической конструкции машины постоянного тока, в предлагаемом ЭМДТЦР, вне зависимости от числа полюсных делений $2\tau = 2p$, только две обмотки возбуждения 8,9 и нет обмоток добавочных полюсов, так как ограничение реакции якоря обеспечивается конструктивными способами. Этим обусловлено значительное уменьшение потерь энергии в такой электрической машине [9].

В ЭМДТЦР кольцевая структура 3 неподвижной части 1 состоит из ряда отдельных магнитно не связанных ферромагнитных стержней – зубцов Ш-образной формы, каждый из которых содержит три зубца, принадлежащих статорам 4, 5, 6, объединенных продольным стержнем – основанием 24. Торцевые части продольных стержней 24 закреплены на немагнитных торцевых щитах 10,11, образуя жесткую конструкцию неподвижной части 1 электрической машины. В промежутках – пазах между стержнями-зубцами Ш-образной формы укладываются секции обмотки якоря 7 [7, 9].

В данном двигателе возможны два способа укладки секций обмотки якоря 7, использование двухслойной обмотки для каждого из статоров 4, 5, 6, или использование общей для всех трех статоров однослойной обмотки (рис. 2.). В любом случае обязательным условием является наличие сдвига проводников секции обмотки якоря одного статора, например, 4, по отношению к другому статору 5 на величину полюсного деления. Этим обеспечивается как

сохранение однонаправленного электромагнитного момента статоров 4, 5, 6 так и компенсация магнитодвижущей силы токов лобовых частей обмотки якоря за счет встречного направления этих токов (рис. 2.). В результате обеспечивается значительное ослабление пульсирующего магнитного потока токов лобовых частей обмотки якоря на пути основного магнитного потока. На рис. 2 представлен вариант подключения секций однослойной обмотки якоря 7 к коммутатору-коллектору 25 со щеточным узлом 26.

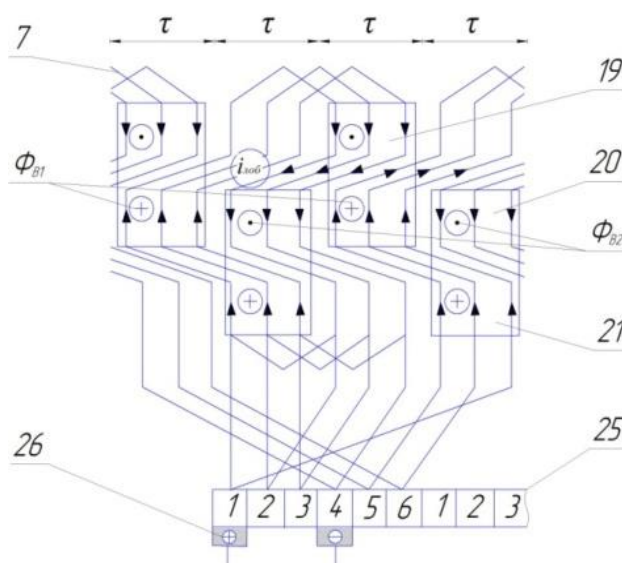


Рис. 2 Схема соединения обмотки якоря ЭМДТЦР

Порядок работы рассматриваемого ЭМДТЦР, следующий [7]. При подаче напряжения на тороидальные обмотки возбуждения 8, 9 взаимодействием основных магнитных потоков $\Phi_{в1}$, $\Phi_{в2}$ и токов проводников секций обмотки якоря 7, находящихся в зоне действия полюсов 19, 20, 21 цилиндрического ротора 2 создается электромагнитный момент $M_{эм}$, под действием которого цилиндрический ротор 2 начинает вращение. Щеточный узел 26, который жестко связан с валом 14 цилиндрического ротора 2, вращаясь относительно недвижимого (как обмотка якоря) коммутатора-коллектора 25, переключает токи в секциях обмотки якоря таким образом, чтобы при вращении, токи проводников,

находящихся в данный момент напротив соответствующих полюсов 19, 20, 21 цилиндрического ротора 2, оставались неизменными. Регулирование частоты вращения и реверс ЭМДТЦР в режиме двигателя постоянного тока осуществляется известным для классических машин способом регулирования подводимого напряжения.

Оригинальное конструктивное решение ЭМДТЦР позволяет [4, 8, 10]:

- значительно ослабить реакцию якоря и довести перегрузочную способность по току $K_i = I_{доп} / I_n$ до 5 - 7, так как зубцы не имеют общего ярма и магнитно не связаны;

- сократить (до 30%) расход обмоточной меди за счет отсутствия дополнительных полюсов и компенсационной обмотки;

- существенно улучшить условия теплоотвода через конструктивные зазоры между стержнями статора;

- улучшить энергетические показатели двигателя.

Масса вращающегося ротора подобно-го двигателя в 3–5 раз меньше, чем у классического двигателя, пропорционально уменьшается и момент инерции. При этом в 5–7 раз увеличивается быстродействие двигателя, а значит, электропривода в целом. При таком уменьшении момента инерции ротора потери энергии в переходных режимах в ЭМДТЦР на порядок ниже, чем у классического двигателя постоянного тока. Подобная конструкция обеспечивает модульный принцип их изготовления на различные мощности последовательным чередованием дискового ротора и модуля якоря, а если выполнить усовершенствование путём установки на вращающемся роторе постоянных магнитов (т.е., применить комбинированное возбуждение), чередующихся с ферромагнитными полюсами, то это позволит в 2 раза увеличить мощность ЭМДТЦР при неизменных массогабаритных показателях [10].

Выводы. При синтезе инновационных безредукторных лебедок актуальным является потребность в тихоходных приводных двигателях со скоростями порядка 40–100 об/мин. Выполнить такие двигатели при традиционных подходах, и при приемлемых массе и габаритах, на сегодняшний

день, затруднительно. Практические результаты с удовлетворительными показателями достигаются за счет технических решений, которые значительно облегчают требования к минимальной скорости, и доводят ее до 400–750 об./мин. Однако, большинство этих решений можно признать не удовлетворительными.

В качестве приводного тихоходного двигателя безредукторной лифтовой лебедки предлагается использовать инновационный двигатель постоянного тока бииндукторного типа с безобмоточным цилиндрическим ротором. При этом прогнозируемые преимущества такого лифтового электропривода:

- из кинематической цепи может быть исключен энергонезэффективный червячный редуктор, при том, что масса и габариты тихоходного приводного двигателя, не превысят массу и габариты двухскоростного быстроходного асинхронного двигателя в базовом варианте. Это обеспечит увеличение коэффициента полезного действия электропривода, относительно базового - двухскоростного, в статических режимах его работы.

- значительно уменьшится доля инерционности электропривода по отношению к инерционности перемещаемого груза, за счет уменьшения инерционности ротора двигателя. Это приведет к увеличению коэффициента полезного действия лифтового электропривода в динамике;

- улучшатся регулировочные показатели электропривода лифтового подъемного механизма.

Список использованной литературы:

1. Макаров Л.Н. Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности [Текст] / Л. Н. Макаров // Электротехника. – М.:–2006.- Вып. 5. – С. 42-46.

2. Лифты без машинного помещения KONE Monospace: Корпорация «KONE» [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://cdn.kone.com/www.kone.ua/ru/Images/brochure-monospace-500.pdf?v> (дата доступа 24.02.2016).

References

3. Jong J. The advantage of PMSM Elevator Tehnology in High Rise Building, Proc-essing of Elevcon [Text] / J. Jong, H. Nakala. – 2000. – IАЕЕ. – 284 p.

4. Андриященко, О. А. Вимоги до приводного двигуна безредукторної лебідки пасажирського ліфта [Текст] / О. А. Андриященко, А. О. Бойко, В. В. Булгар, Д. А. Івлєв // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К: Техніка, 2011. – Вып. 03 (79). – С. 163 - 166.

5. Austin Hughes. Electric motors and drives. [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.emic-bg.org/files/Electric_Motors___Drives.pdf(дата доступа 24.02.2016).

6. Janovsky, L. Vitahy a askalatory [Text] / L. Janovsky, I. Dolezal. – Praha – 1980. – 590 p.

7. Патент Украины №104943, МПК (2014), НО2К 29/06. Электрична машина бііндукторного типу. / О.А. Андриященко, В.В. Булгар, А.О. Бойко, Івлєв Д.А., Яковлев О.В., Косенков В.Д. //–a201211580, заявл. 08.10.2012, опубл. 25.03.2014, Бюл. №6.

8. Винаков А.Ф. Двигатель постоянного тока индукторного типа для ввода вращения в герметичный объем. [Текст] / А.Ф.Винаков, А.Д.Івлєв // Електромашинобуд. та електрообладн. – К: Техніка. – 2006. – Вып. 75. – С.68 – 70.

9. Samitha Ransara H. K. Modelling and analysis of a low cost Brushless DC motor drive[Электронный ресурс]:Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6505698&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6505698 (дата доступа 4.02.2016).

10. Булгар В. В. Регулируемый электропривод постоянного тока безредукторной лебедки пассажирского лифта [Текст] / В. В. Булгар, А. А. Бойко, Д. А. Івлєв // Тр. Одес. политехн. ун-та.– Одеса: – 2013. – Вып. 3 (42). – С. 101 – 117.

Получено 14.02.2016

1. Makarov L.N Sovremennyiy elektroprivod skorostnyih liftov povyishennoy komfortnosti [The modern electric drive of high-speed elevators of the increased comfort], (2006), Elektrotehnika, Vol. 5, pp. 42 – 46 (In Russian).

2. Liftyi bez mashinnogo pomescheniya KONE Monospace: Korporatsiya “KONE” [Elevators without machine room of KONE Monospace: KONE corporation] [Electronic Resource] (In Russian), available at: <http://cdn.kone.com/www.kone.ua/ru/Images/brochure-monospace-500.pdf?v/> (accessed 30.04.2013)

3. Jong J. The advantage of PMSM Elevator Tehnology in High Rise Building, Proc-essing of Elevcon, (2000), – IАЕЕ. – 284 p. (In English).

4. Andryuschenko, O. A. Vimogi do privodnogo dviguna bezreduktornoyi lebidki pasazhirskogo lifta [Requirements for the drivemotor unreducer winch passenger elevator]/ O. A. Andryuschenko, A. O. Boyko, V. V. Bulgar, D. A. Ivlev // ElektrotehnikI ta komp'yuternI sistemi, Technika, (2011), Kyiv, Ukraine, Vol. 03 (79). – pp. 163 – 166. (In Russian).

5. Austin Hughes. Electric motors and drives. Third edition, (2006). Published by Elsevier Ltd. 410 p. (In English).

6. Janovsky, L. Vitahy a askalatory / L. Janovsky, I. Dolezal., (1980) – Praha,. – 590 p. (In English).

7. Patent of Ukraine №104943, МПК (2014), НО2К 29/06 Elektrichna mashina biinduktornogo tipu. [Double inductor type electrical machine] / О.А. Andryuschenko, V.V. Bulgar, А.О. Boyko, Івлєв Д.А., Яковлев О.В., Косенков В.Д. //–a201211580, st. 08.10.2012, publ. 25.03.2014, no. 6.

8. Vinakov A.F. Dvigatel postoyannogo toka induktornogo tipa dlya vvoda vrascheniya v germetichnyiy ob'em. [DC motor inductor type to enter rotation in the sealed volume] /A.F.Vinakov, A.D.Ivlev // Elektromashinobud. ta elektroobladn. Technika, (2006), Kyiv, Ukraine, Vol. 75. – pp. 68–70. (In Russian).

9. Samitha Ransara H. K. Modelling and analysis of a low cost Brushless DC motor

drive [Text] / H. K. Samitha Ransara, U. K. Madawala // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, art. no. 6505698, (2013). – P. 356–361. (In English).

10. Bulgar, V. V. Reguliruemiy elektropriwod postoyannogo toka bezreduktornoy lebedki passazhirskogo lifta [Controlled electric DC direct drive winches passenger elevator] / V. V. Bulgar, A. A. Boyko, D. A. Ivlev // Tr. Odes. politehn. un-ta, Odesa, Ukraine, (2013), Vol. 03 (42). – pp. 101–117. (In Russian).



Бойко
Андрей Александрович,
доктор технических наук,
директор института электромеханики и энергоне-
менджмента, доцент кафе-
дры ЭМСКУ ОНПУ



Булгар
Виктор Васильевич,
кандидат технических
наук, профессор,
заведующий кафедрой
естественных наук
ОНПУ



Винаков
Александр Федорович,
кандидат технических
наук, доцент кафедры
ТОЗЕ ОНПУ



Бесараб
Алена Александровна,
ас. кафедры ЭМСКУ
ОНПУ