

УДК 621.313.333.

Бойко А.А, к.т.н., Булгар В.В., к.т.н., Ивлев Д.А.

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМАХ ЛИФТОВ

Проблема модернизации и обновления существующего парка массовых пассажирских лифтов очень актуальна в последние годы. А если учесть, что абсолютное большинство лифтов, установленных в жилых домах еще в 70-е годы прошлого столетия и выработавших расчетные сроки эксплуатации, то через несколько лет эта проблема может приобрести аварийное значение. Решение проблемы за счет закупок импортного оборудования может быть только частичной, даже при существовании в Украине ряда фирм по продаже, ремонту и сервисному обслуживанию лифтового оборудования. Необходима государственная поддержка по созданию отрасли машиностроения – лифтостроения. Действующие небольшие заводы по производству лифтов проблему не решают.

На основе известных зарубежных образцов лифтов и общих тенденций в прогрессе электронных и электромеханических систем преобразования энергии и систем управления можно выделить ряд перспективных направлений в модернизации лифтового хозяйства, особенно пассажирских лифтов: переход к безредукторным лебедкам; применение регулируемых экономичных систем электропривода с использованием электродвигателей новых прогрессивных конструкций. В работе предложен модернизированный вариант пассажирского лифта.

Наиболее распространенными среди пассажирских лифтов, установленных в жилых домах, являются лифты с прямой подвеской кабины грузоподъемностью от 400 до 1000 кг и скоростью до 1,6 м/с. В состав лебедки входит двигатель, канатоведущий шкив, червячный редуктор. Масса кабины 1250 кг, масса противовеса 1500 кг, асинхронный двухскоростной двигатель 7/1,75 кВт, с КПД 85 % и массой 440 кг, червячный (глобоидный) редуктор с КПД 63% и массой 400 кг. В дальнейших расчетах такой вариант исполнения пассажирского лифта был принят как базовый.

В базовом варианте лифта электропривод нерегулируемый на базе двухскоростного асинхронного двигателя. Пониженная скорость двигателя необходима для точной остановки кабины с пассажирами. Результирующий КПД лифта с учетом КПД отдельных звеньев оставляет желать лучшего.

$$\eta_{\text{л}} = \eta_{\text{кп}} \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{д}} = 0,95 \cdot 0,63 \cdot 0,85 = 0,508,$$

где  $\eta_{кп}$  – КПД канатной передачи;  $\eta_p$  – КПД редуктора;  $\eta_d$  – КПД асинхронного двигателя. Такой низкий КПД лифта связан с большими потерями энергии в отдельных его звеньях.

„Слабыми” звеньями лифта являются редуктор и частично двигатель. Кардинальным решением в вопросе повышения КПД лифта является отказ от редуктора. Модернизированный вариант электропривода лифта можно рассматривать как регулируемый безредукторный. Это позволит значительно уменьшить потребление электроэнергии, обеспечить высокую комфортность перемещения пассажиров, точную остановку кабины лифта, регулирование скорости кабины и производительности лифта в целом.

Для дальнейших расчетов примем за базовый пиковый утренний режим работы лифта жилого дома. На рис. 1 представлены типовые графики перемещения кабины лифта и диаграмма нагрузок на валу приводного электродвигателя при скорости кабины 1,6 м/с с полиспастной подвеской кабины и противовеса.

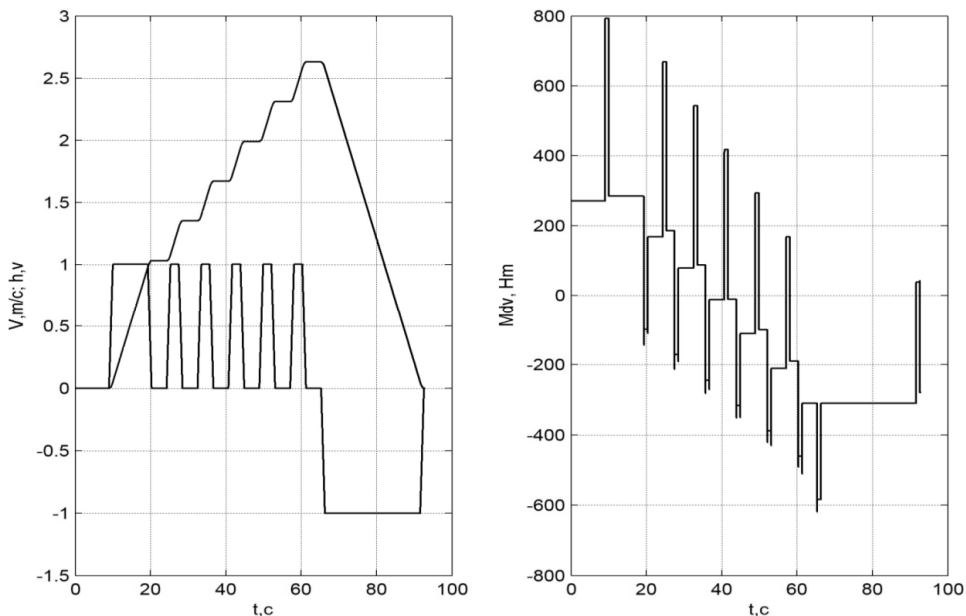


Рисунок 1 - Графики перемещения кабины лифта и диаграмма нагрузок на валу двигателя

Дальнейшие расчеты проводились на базе моделирования работы электропривода [1] согласно графика (рис.1). Расчетные данные получены при моделировании работы электропривода базового варианта лифта – электропривода на базе двухскоростного асинхронного двигателя с редуктором. Проектные данные получены при моделировании работы электропривода модернизированных вариантов лифтов – безредукторного электропривода на базе двигателя постоянного тока с безбмоточным ротором (ДПТБР) торцевого типа

[2] и бииндукторного ДПТБР цилиндрического типа с возбуждением от постоянных магнитов [3]. Расчеты выполнены для скоростей движения кабины 1 м/с, 1,6 м/с, 2 м/с с полиспастной подвеской кабины и противовеса и без неё, как для базового варианта лифта так и для модернизированных. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Для оценки преимуществ и недостатков низкоскоростных ДПТБР торцевого и цилиндрического типов во всех расчетах были приняты одинаковые электромагнитные нагрузки и выбраны схожие конструктивные схемы. Из приведенных расчетных и проектных результатов следует, что для всех скоростей кабины при реализации графика её движения от двигателей требуется практически одинаковые моменты.

Анализируя полученные результаты (таб.1), можно прийти к выводу, что ДПТБР торцевого типа обладают меньшим моментом инерции, чем цилиндрические машины, но уступают им по КПД. Поэтому в качестве приводного двигателя целесообразно рассматривать конструкцию цилиндрического типа.

Однако следует отметить, что с увеличением мощности привода низкоскоростные ДПТБР торцевого типа выглядят более предпочтительно, т.к., поскольку торцевые машины имеют большое отношение диаметра к длине, то увеличение массы обмотки якоря не приводит к существенному увеличению основного размера торцевой машины – ее диаметра.

Для бииндукторного ДПТБР цилиндрического типа для всех вариантов скорости движения кабины с полиспастом и без него масса двигателя колеблется от 319 кг до 178 кг, которая является более приемлемой по сравнению с массой базового двигателя (440 кг) и червячного редуктора (400 кг).

ДПТБР бииндукторного типа развивают необходимые моменты при понижении мощности, а КПД двигателя увеличивается до 91% с уменьшением момента инерции ротора. Уменьшение массы приводного двигателя и исключение редуктора позволит значительно уменьшить громоздкость и тяжеловесность подвижных частей лифта.

Таблица 1 - Расчетные и проектные данные приводных двигателей лифтов

Показатель	Ед. изм.	Скорость 1 м/с		Скорость 1,6 м/с		Скорость 2 м/с	
		Без пол.	С пол.	Без пол.	С пол.	Без пол.	С пол.
<i>Расчетные данные</i>							
Расчетная скорость	1/с	3,92	7,85	6,29	12,57	7,86	15,72
Расчетный момент	Н·м	618	304	691	370	827	399

Показатель	Ед. изм.	Скорость 1 м/с		Скорость 1,6 м/с		Скорость 2 м/с	
		Без пол.	С пол.	Без пол.	С пол.	Без пол.	С пол.
Максимальный момент	Н·м	2008	901	2008	932	2535	991
Расчетная мощность	Вт	2428	2389	4348	4655	6503	6275
<i>Проектные данные для ДПТБР торцевого типа с возбуждением от постоянных магнитов</i>							
Номинальная скорость	1/с	4	8	6	13	8	16
Номинальный момент	Н·м	625	316	702	364	824	401
Номинальная мощность	Вт	2499	2531	4214	4729	6596	6417
Номинальный КПД	%	75	81	82	85	84	87
Момент инерции ротора	кг·м <sup>2</sup>	0,21	0,08	0,23	0,086	0,28	0,11
Габариты двигателя (длина/диаметр)	м/м	0,33/ 0,45	0,31/ 0,36	0,33/ 0,46	0,31/ 0,38	0,34/ 0,49	0,31/ 0,39
Масса двигателя	кг	217	130	224	147	273	159
<i>Проектные данные для биндукторного ДПТБР цилиндрического типа с возбуждением от постоянных магнитов</i>							
Номинальная скорость	1/с	3,6	7,9	6,1	12,5	7,6	15,4
Номинальный момент	Н·м	756	393	708	390	859	399
Номинальная мощность	Вт	2720	3103	4318	4871	6529	6141
Номинальный КПД	%	83	84	88	90	89	91
Момент инерции ротора	кг·м <sup>2</sup>	4,38	0,83	4,3	0,96	6,2	0,89
Габариты двигателя (длина/диаметр)	м/м	0,23/ 0,93	0,50/ 0,59	0,18/ 0,93	0,31/ 0,63	0,16/ 1,0	0,26/ 0,64
Масса двигателя	кг	263	319	225	210	250	178

Представляет интерес энергопотребление базового и модернизированных вариантов лифтов в статическом (движение кабины с грузом с установившейся скоростью) и динамическом (процесс пуска лифта) режимах. Энергетическая эффективность электромеханической части лифта может быть рассмотрена на базе энергетических диаграмм для каждого из режимов работы. Метод энергетических диаграмм [4] заключается в разложении всей

потребленной из сети энергии на отдельные составляющие, расходуемые на приведение в движение кабины с грузом, в механической части подъёмного механизма лифта и электропривода.

Рассмотрим динамический режим работы лифта.

Определим базовую энергию одного пуска

$$A_{\text{бп}} = W_r + A_r = 1280 + 6278 = 7558 \text{ Дж},$$

где  $W_r = \frac{m_r \cdot V_k^2}{2} = \frac{1000 \cdot 1,6^2}{2} = 1280 \text{ Дж}$  - кинетическая энергия номинальной массы груза;

$A_r = h_n \cdot 500 \cdot g = 1,28 \cdot 500 \cdot 9,81 = 6278 \text{ Дж}$  - работа силы тяжести груза на пути прохождения кабины ( $h_n = 1,28 \text{ м}$ ).

Кинетическая энергия кабины и противовеса

$$W_{\text{кн}} = \frac{(m_k + m_{\text{п}}) \cdot V_k^2}{2} = 3200 \text{ Дж}.$$

Кинетическая энергия шкивов и блоков

$$W_{\text{шб}} = \frac{J_{\text{бл}} \cdot \omega_{\text{бл}}^2}{2} = 1824 \text{ Дж}.$$

Кинетическая энергия ротора двигателя

$$W_{\text{дв}} = \frac{J_{\text{дв}} \cdot \omega_{\text{дв}}^2}{2} = \frac{0,58 \cdot 157^2}{2} = 7148 \text{ Дж}.$$

Энергия на валу двигателя за время одного пуска

$$A_{\text{дв}} = \frac{A_{\text{кш}}}{\eta_p} = \frac{13244}{0,75} = 17658 \text{ Дж}.$$

Потери энергии в редукторе с учетом КПД редуктора  $\Delta A_p = 4414 \text{ Дж}$ .

Энергия, потребляемая из сети

$$A_1 = \frac{A_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}}} + 3 \cdot (W_{\text{дв}} + W_p) = \frac{17658}{0,85} + 3 \cdot (7148 + 1072) = 45434 \text{ Дж}.$$

Коэффициент полезного действия лифта за время пуска

$$\eta_{\text{лп}} = \frac{A_{\text{б}}}{A_1} = \frac{7558}{45434} = 0,1663.$$

Таким образом, КПД лифта при пуске  $\eta_{\text{лп}} = 16,63\%$  очень низкий и свидетельствует о больших потерях энергии в динамическом режиме работы.

Проведем расчеты для статического режима работы лифта.

Для режима движения с установившейся скоростью за базовую величину принята полезная мощность, требуемая для поднятия номинального груза с номинальной скоростью, с учетом влияния противовеса

$$P_{\text{бу}} = V_{\text{к}} \cdot 0,5 \cdot m_{\text{г}} \cdot q = 1,6 \cdot 0,5 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 7848 \text{ Вт.}$$

Определим базовую энергию для перемещения номинального груза на 1 этаж с номинальной скоростью

$$A_{\text{бу}} = P_{\text{бу}} \cdot \frac{3}{V_{\text{к}}} = 7848 \cdot \frac{3}{1,6} = 14715 \text{ Дж.}$$

Мощность на валу канатоведущего шкива

$$P_{\text{кш}} = \frac{P_{\text{бу}}}{\eta_{\text{кш}}} = \frac{7848}{0,95} = 8261 \text{ Вт.}$$

Потери мощности в канатной передаче

$$\Delta P_{\text{кш}} = 0,05 \cdot P_{\text{кш}} = 0,05 \cdot 8261 = 413 \text{ Вт.}$$

Мощность на валу двигателя

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{кш}}}{\eta_{\text{р}}} = \frac{8261}{0,63} = 13112 \text{ Вт.}$$

Потери мощности в редукторе

$$\Delta P_{\text{р}} = P_{\text{дв}} - P_{\text{кш}} = 13112 - 8261 = 4851 \text{ Вт.}$$

Потребляемая из сети мощность

$$P_1 = \frac{P_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}}} = \frac{13112}{0,85} = 15425 \text{ Вт.}$$

Потери мощности в двигателе

$$\Delta P_{\text{дв}} = 0,15 \cdot P_1 = 0,15 \cdot 15425 = 2313 \text{ Вт.}$$

Энергия, потребляемая из сети

$$A_1 = 1,875 \cdot P_1 = 15425 \cdot 1,875 = 28921 \text{ Дж.}$$

КПД лифта при перемещении груза с установившейся скоростью.

$$\eta_{\text{лу}} = \frac{A_{\text{б}}}{A_1} = \frac{14715}{28921} = 0,5087. \quad \eta_{\text{лу}} = 50,87\%$$

Аналогично проведены расчеты для процесса пуска лифта и перемещения номинального груза на один этаж для двигателя

постоянного тока с безобмоточным ротором бииндукторного типа с возбуждением от постоянных магнитов. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2 - Расчетные данные энергетических показателей базового и модернизированного вариантов электропривода лифтов

Тип механической передачи	Редуктор и полиспаст	Полиспаст
Тип электропривода	Базовый вариант (АД)	ДПТБР бииндукторного типа
Мощность приводного двигателя, кВт	7	6,2
Частота вращения приводного двигателя, об/мин	1500	150
КПД приводного двигателя, %	85	91
Момент инерции ротора двигателя, кг·м <sup>2</sup>	0,58	0,89
Масса приводного двигателя, кг	440	178
<i>Процесс пуска лифта</i>		
Базовая энергия одного пуска, Дж	7558	7558
В том числе кинетическая энергия груза, Дж	1280	1280
Кинетическая энергия кабины и противовеса, Дж	3200	3200
Кинетическая энергия шкивов и блоков, Дж	1824	1824
Кинетическая энергия ротора двигателя, Дж	7148	106
Кинетическая энергия редуктора, Дж	1072	-
Потери энергии в канатной передаче, Дж	662	662
Потери энергии в редукторе, Дж	4414	-
Потери энергии в двигателе, Дж	2472	1482
Энергия, потребленная из сети, Дж	45434	14870
КПД лифта, %	16,63	50,87
<i>Перемещение номинального груза на один этаж</i>		
Базовая энергия, Дж	14715	14715
Потери энергии в канатной передаче, Дж	774	774
Потери энергии в редукторе, Дж	9095	-
Потери энергии в двигателе, Дж	4336	1240
Энергия, потребленная из сети, Дж	28921	17021
КПД лифта, %	50,87	86,45

Анализ энергетических показателей процесса пуска показывает, что эквивалентный КПД для базового варианта лифта составляет 16,63%. Такой низкий КПД обусловлен большими потерями энергии в громоздких и тяжеловесных подвижных частях лифта (ротор двигателя, редуктор). В модернизированном варианте лифта с ДПТБР эквивалентный КПД достигает 50,82 % за счет малой инерционности двигателя и потерь энергии в нем, а также исключения из системы редуктора.

Для процесса перемещения кабины с грузом эквивалентный КПД для базового варианта увеличивается до 50,87%, так как асинхронный двигатель работает на достаточно жесткой естественной характеристике и потери энергии в нем значительно сокращены в сравнении с процессом пуска. Для модернизированного варианта с ДПТБР этот показатель КПД увеличивается до 86,45% за счет

уменьшения потерь в самом двигателе и его высокого КПД при низких оборотах.

### **Выводы**

1. Приведенные расчеты показывают энергетические преимущества применения двигателей постоянного тока безобмоточным ротором в низкооборотных безредукторных приводах механизмов подъёмов лифтов.

2. Благодаря улучшенным массогабаритным показателям ДПТБР бииндукторного типа с возбуждением от постоянных магнитов возможен реальный и перспективный переход к безредукторным лебедкам пассажирских лифтов, возможность максимально облегчить механические части лифта, отказаться от редуктора.

3. Исключение редуктора из системы и менее массивный ДПТБР позволит значительно улучшить соотношение полезной массы груза к суммарной массе движущихся составляющих элементов лебедки в пользу груза.

4. Применение ДПТБР в безредукторных приводах лебедок в сочетании с широтноимпульсным преобразователем позволит создать регулируемый низкоскоростной привод и улучшить комфортность перемещения пассажиров, изменять скорость перемещения кабины лифта с высокими энергетическими показателями.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Андриющенко О.А. Вимоги до приводного двигуна без редукторної лебідки пасажирського ліфта/ О.А. Андриющенко, В.В. Булгар, А.О. Бойко, Д.А. Івлєв // Науково-технічний журнал "Електротехнічні та комп'ютерні системи". — 2011. — № 03(79). — С. 163—166.

2. Патент України №78249, МПК(2006), Н02К 291/06 Безконтактний двигун постійного струму з дисковим ротором./ В.В.Булгар, В.В. Гололобов, А.Д. Івлєв, О.В. Яковлєв //—20040604361, заявл. 07.06.2004, опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.

3. Патент України №95429, МПК(2011), Н02К 19/06 Торцева електрична машина бііндукторного типу. / В.В. Булгар, А.Д. Івлєв Д.А. Івлєв, О.В. Яковлєв, В.Д. Косенков //—201014458, заявл. 03.12.2010, опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.

4. Андриющенко О.А. Пассажирский лифт как электромеханическая система. Перспективы и проблемы совершенствования энергетических показателей / О.А. Андриющенко, В.В. Булгар, В.Ф. Семнюк // Научно-технический и производственный журнал "Подъемные сооружения. Специальная техника". —Одесса, февраль-март 2010. — № 2-3(100). — С. 23—28.