



УДК 621.313.333

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В БЕЗРЕДУКТОРНОМ СИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПАССАЖИРСКОГО ЛИФТА

ECONOMIC EFFICIENCY ESTIMATION OF USING THE SUPERCAPACITORS IN THE GEARLESS SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF THE PASSENGER ELEVATOR

Плотников Юрий Валерьевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru. Тел.: 375-46-46.

Постников Никита Вадимович, инженер-конструктор, Филиал АО НПОА «ОКБ Автоматика», Россия, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка 145, E-mail: np_93@mail.ru. Тел.: +7 (902) 269-59-58

Yury V. Plotnikov, Cand Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yu.v.plotnikov@urfu.ru. Ph.: 375-46-46.

Nikita V. Postnikov, Design engineer, Filial Branch of AO NPOA «OKB Avtomatika», 620075, Mamina-Sibiryaka street, 145, Ekaterinburg, Russia. E-mail: np_93@mail.ru. Ph.: +7 (902) 269-59-58

Аннотация: Рассматривается использование суперконденсаторов в безредукторном электроприводе на основе низкоскоростного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Представлены результаты математического моделирования, а также экономический анализ целесообразности использования емкостных накопителей в механизме пассажирского лифта.

Abstract: Using of supercapacitors in the gearless electric drive based on the low-speed synchronous motor with permanent magnets excitation is considered. Results of mathematical simulation, the economic practicability analysis of supercapacitors applying in the passenger elevator mechanism are provided.

Ключевые слова: безредукторный электропривод; суперконденсатор; энергоэффективность.

Keywords: gearless electric drive; supercapacitor; energy efficiency.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние годы в Российской Федерации актуализировалась тематика энергосбережения и энергетической эффективности по отношению, главным образом, к общепромышленному сектору. Требуется техническая реструктуризация существующих промышленных объектов в вопросах снижения потребления электрической энергии, а также оптимизации иных энергетических показателей.

В настоящее время отечественный лифтостроительный парк нуждается в современных технических решениях, поскольку большая часть электроприводов требует срочной замены ввиду превышения допустимого срока эксплуатации. На сегодняшний день, как правило,

в подавляющем большинстве жилых зданий пассажирские, грузопассажирские и грузовые лифты в качестве приводного механизма используют редукторные лебедки с асинхронным двухскоростным электромеханическим преобразователем. Наличие редуктора является нежелательным фактором, так как увеличиваются массогабаритные показатели установки, повышается уровень шума в машинном помещении, снижается коэффициент полезного действия электропривода из-за потерь в редукторе ввиду наличия люфтов в механических связях. Исключение редуктора путем подбора соответствующего приводного механизма позволяет обеспечить жесткие требования по износостойкости, упростить монтаж и техническое обслуживание в целом. Тем самым

возникает тенденция к использованию безредукторных электрических приводов в составе как пассажирских, так грузовых лифтов. В работе [6] проведено сравнение редукторных и безредукторных лифтовых лебедок на основе асинхронного и синхронного двигателей соответственно, с точки зрения энергетической эффективности. Показано, что энергопотребление безредукторных лебедок на основе низкоскоростной синхронной машины существенно меньше (на 40-50%) в сравнении с редукторными на основе высокоскоростного асинхронного двигателя. Тем самым, изучение безредукторного электропривода в составе лифта является актуальной задачей с точки зрения дальнейших исследований в области оптимизации энергетической эффективности. Также в работах [4, 5] приведены достоинства безредукторного привода в сравнении с редукторным.

Ввиду того, что традиционно управление синхронной машиной в составе безредукторной лифтовой лебедки осуществляется с помощью двухзвенного преобразователя частоты, именно данный элемент является оптимизационным «ключом» с точки зрения вопросов энергетической эффективности. В механизме лифта весьма непростой задачей является снижение энергопотребления в двигательных режимах работы механизма, поэтому, как правило, энергетическая оптимизация производится путем полезного использования выделяемой электромеханическим преобразователем энергии в генераторных режимах работы. В работах [1,2] приводятся некоторые из способов использования энергии торможения, а также указываются их преимущества и недостатки. Кроме того, с помощью математического моделирования, проведен анализ целесообразности использования емкостных накопителей энергии в составе редукторной лифтовой лебедки на основе асинхронного двигателя. Результаты исследований показали, что применение накопителей электрической энергии большой емкости является одним из самых легкорезализуемых способов использования энергии торможения и целесообразно в безредукторных лебедках.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель частотно-регулируемого электропривода включает в себя модель силовой части электропривода, которая состоит из преобразователя частоты, синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) и векторную систему автоматического управления с ориентацией по вектору потокосцепления ротора [6]. Как известно, сложность явлений, происходящих как в преобразовательных агрегатах, так и электрических машинах переменного тока при переходных процессах,

делает их математическое описание и исследование без ряда допущений практически невозможным. Стремление учесть главные факторы, определяющие свойства исследуемых объектов, и пренебречь второстепенными, приводит к рассмотрению:

- а) эквивалентной непрерывной модели преобразователя частоты [1,2], не учитывающей переходные процессы при переключении полупроводниковых ключей выпрямителя и автономного инвертора напряжения;
- б) идеализированной модели СДПМ [8] со следующими допущениями:
 - отсутствует насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
 - обмотки статора симметричны;
 - индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Все параметры математических моделей записываются в системе относительных единиц [7]. Система уравнений в векторной форме, предложенная в [1,2] для математического описания преобразователя частоты при непрерывной аппроксимации коммутационных функций, выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U &= U_v + R_{кр} I + T_{\sigma} L_{кр} p I + \omega_c B L_{кр} I; \\ u_v &= \frac{3}{2} \Phi_v \bullet U_v; \\ u_d &= \begin{cases} u_v & \text{при } f = 1, \\ u_u & \text{при } f = 0; \end{cases} \\ T_{\sigma} p i_d &= l_d^{-1} [(u_d - u_u) - r_d i_d]; \\ T_{\sigma} p u_u &= c_d^{-1} i_c; \\ i_c &= i_d - i_u; \\ U_s &= u_u \Phi_{ин}; \\ \Phi_{ин} &= \Phi_{ин}(U^*); \\ i_u &= \frac{3}{2} \Phi_{ин} \bullet I_s; \\ \omega_c &= T_{\sigma} p \theta_c, \end{aligned} \right\} (1)$$

где $R_{кр}$, $L_{кр}$ – преобразованные матрицы активных сопротивлений и индуктивностей коммутирующих реакторов; $r_{кр}$ и $l_{кр}$ – параметры коммутирующих реакторов; ω_c – угловая частота питающего напряжения в относительных единицах. Математическое описание отдельных элементов системы уравнений (1), а также неуправляемого выпрямителя, звена постоянного тока и автономного инвертора напряжения подробно описано в [1,2]. Как известно, в задачах математического моделирования конденсатор описывается интегрирующим звеном. Описание

же суперконденсаторов предполагает использование различных вариантов схем замещения, состоящих из нескольких активных сопротивлений и емкостей для более точного представления о переходных процессах в режимах заряда и разряда. Одним из примеров может быть схема замещения, представленная в [1,2]. Математическое описание схемы замещения в отношении вопросов моделирования также описано в [1,2]. Для упрощения математического описания синхронного двигателя с постоянными магнитами используется система координат $d-q$, жестко связанная с ротором, при этом ось d совмещается с направлением магнитного поля ротора. Система уравнений, описывающая идеализированную модель СДПМ, а такжеструктурная схема данной модели приведены в [8].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В качестве объекта управления рассмотрим пассажирский лифт с использованием безредукторной лебедки. Лифт установлен в 9-этажном здании, грузоподъемность 400 килограммов, линейная скорость кабины 1,0 м/с, кратность полиспаста 1:1. В качестве приводного двигателя используем низкоскоростной синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов производства компании «ОКБ Автоматика» (г. Екатеринбург). Машина обращенного исполнения, неявнополюсная, с номинальной мощностью 2,8 кВт и номинальной скоростью вращения 48 об/мин. Режим работы электропривода лифта выбирается исходя из среднестатистических данных, приведенных в [9]. Принимаем, что число пассажиров, находящихся в лифте в 9-этажном здании в среднем составляет 2 человека (150 кг), машинное время работы 3-4 часа, число включений в час в среднем 371-550. В случае использования накопителя энергии, подключение суперконденсатора параллельно звену постоянного тока не является единственным возможным вариантом, а выбирается исходя из схемной простоты и минимизации изменений в системе управления электроприводом. Методика выбора модели суперконденсатора рассматривается в [1,2]. Минимальное значение рабочего напряжения 513 В, максимальное 750 В соответственно. Выбор емкости суперконденсатора осуществляется исходя из получаемого на заряд количества энергии, отдаваемой механизмом в генераторном режиме работы. После осуществления необходимых расчетов, требуемое значение составило 0,5 Ф.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 представлены переходные процессы, полученные в результате математического моделирования при использовании конденсаторов с емкостями 500 мкФ и 0,5 Ф соответственно. В первом случае используется принцип рассеивания энергии торможения на резисторе (емкость – 500 мкФ), во втором – накопления энергии в суперконденсаторе и дальнейшего использования в двигательных режимах работы механизма (емкость 0,5 Ф). Стоит отметить, что во избежание аварийных ситуаций, тормозное сопротивление, в случае полного заряда суперконденсатора, сохранено. Также для упрощения процедуры моделирования, переходные процессы при заряде и разряде емкостных накопителей во внимание не принимаются.

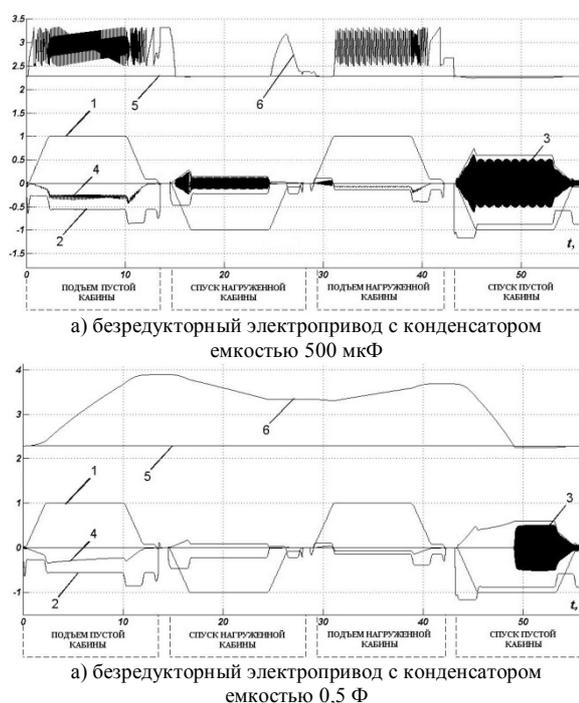


Рис. 1. Переходные процессы в безредукторном синхронном электроприводе пассажирского лифта
1 – скорость двигателя, 2 – электромагнитный момент, 3 – фазные токи на входе преобразователя частоты, 4 – ток на входе инвертора, 5 - напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя, 6 – напряжение на конденсаторе в звене постоянного тока.

Исходя из анализа переходных процессов по фазным токам на входе преобразователя частоты (рис. 1), можно утверждать, что электропривод с использованием суперконденсатора в составе преобразователя частоты потребляет меньше энергии из питающей сети, нежели преобразователь частоты с обычным конденсатором. Видно, что энергии, накопленной суперконденсатором, хватает на использование в двигательных режимах работы безредукторного электропривода. Также стоит отметить, что степень скорости заряда и разряда

суперконденсатора напрямую зависит от величины статической нагрузки электропривода. Для оценки экономической выгоды от использования накопленной энергии в двигательных режимах работы механизма, необходимо произвести расчет энергопотребления для рассмотренных ранее режимов работы безредукторного электропривода лифта. Полученные результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1.
Расчетные результаты энергопотребления

Потребление энергии	Потребление электроэнергии, кВт·ч	
	ЭП с обычным конденсатором	ЭП с суперконденсатором
За час	0,0125	0,006
За сутки	0,3012	0,1440
За год	110	52,5
Годовая экономия эл. энергии, кВт·час.	57,5	
Годовая экономия эл. энергии, %.	52,3	

Исходя из результатов, приведенных в таблице 1, видно, что годовая экономия электрической энергии в безредукторном электроприводе с суперконденсатором составляет чуть более 50 %. Экономия средств при тарифе на электроэнергию 2,65 руб. / кВт·ч составит 152,5 руб./год. Принимая во внимание достаточно высокую цену суперконденсатора и сопоставляя экономическую выгоду от сэкономленных средств на электроэнергию, при сроке службы лифта 25 лет срок окупаемости данного проекта составит более 25 лет, то есть проект является экономически невыгодным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что внедрение данного проекта на сегодняшний день является нецелесообразным с экономической точки зрения, применение суперконденсаторов имеет следующие преимущества:

- 1) результаты моделирования показали, что использование суперконденсаторов в составе безредукторного электропривода позволяет снизить энергопотребления более чем на 50 % в сравнении с обычным конденсатором. Данное преимущество позволяет повысить класс энергетической эффективности лифта в режиме движения [11];
- 2) в аварийных случаях суперконденсатор может быть использован в качестве резервного источника питания, необходимого для перемещения кабины до ближайшей этажной

площадки, открытия дверей и их удержания для обеспечения выхода пассажиров. Необходимость наличия такого источника диктуется документом [10].

Ввиду того, что проект при высокой стоимости суперконденсатора является экономически невыгодным, существует несколько путей снижения срока окупаемости:

- 1) снижение стоимости суперконденсатора;
- 2) снижение стоимости иных конструктивных частей электропривода;
- 3) применение суперконденсатора в приводах, работающих в повторно-кратковременных режимах с резко-переменной нагрузкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Костылев А.В., Плотников Ю.В., Поляков В.Н., Эрман Г.З. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с емкостным накопителем энергии. *Электротехника* № 9, 2012. 30-35 с.
2. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Полунин Ф.А. Математические модели для оценки эффективности применения частотно-регулируемого электропривода с суперконденсаторами в крановых механизмах. *Электротехника* № 9, 2014. 24-29 с.
3. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р. Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НТИ, 2001.
4. Афонин В.И. К вопросу о безредукторных приводах лифтов // *Лифт*. 2009. № 6. С. 51-57.
5. Виноградов А.Б. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, С.В. Журавлев // *Силовая электроника*. 2007. № 1. С. 45-52.
6. Ганкевич Е.Ю. Энергосбережение и надежность работы лифтов // *Лифт*. 2011. № 3. С. 45-48.
7. Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами – Кишинев: Штиинца, 1982.
8. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 321 с.
9. Лифты: Учебник. / Архангельский Г.Г., Волков Д.П., Горбунов Э.А. и др. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 576 с.
10. ГОСТ Р 53780 – 2010. Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке. М.: Стандартинформ, 2010. 74 с.
11. ГОСТ Р 54764 – 2011. Лифты и эскалаторы. Энергетическая эффективность. М.: Стандартинформ, 2011. 17 с.