На правах рукописи

ГАЛКИН АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛИФТА С НИЗКОСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированного электропривода» Московского энергетического института (технического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Масандилов Лев Борисович;

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Шевырев Юрий Вадимович

кандидат технических наук, Мелихов Владимир Львович

Ведущая организация: Высоковольтный научно-исследовательский центр Всероссийского электротехнического института – филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский электротехнический институт имени В.И.Ленина» (ВНИЦ ВЭИ – филиал ФГУП ВЭИ)

Защита диссертации состоится «13» мая 2011 г. в 14 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского энергетического института (технического университета).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим отправлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет МЭИ (ТУ).

Автореферат разослан «12» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.02
кандидат технических наук, доцент Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В Российской Федерации используется около 500 000 лифтов. Порядка 430 тысяч лифтов эксплуатируются в жилом фонде, из них по разным оценкам 35-50 % нуждается в модернизации или замене, поэтому разработки современного отечественного лифтового оборудования являются актуальными. Технические показатели лифтов в значительной степени определяются характеристиками используемого электропривода.

Основным типом применяемого электропривода лифта является редукторный с двухскоростным асинхронным двигателем. Такой электропривод широко используется до настоящего времени, однако имеет ряд недостатков технико-экономического характера. Производство редукторов – трудоемкий процесс, требующий наличия сложного оборудования. Редукторы нуждаются в регулярном техническом обслуживании (замене масла, уплотнительных сальников и т. д.). Силы трения в редукторе обусловливают потери энергии, что снижает энергетические показатели электропривода.

Современным направлением в развитии приводной техники является упрощение или исключение механических передаточных устройств. В частности, в 90-е годы XX-го века в области лифтостроения наметилась тенденция перехода к безредукторному электроприводу.

Безредукторные электроприводы лифта вызывают большой интерес у специалистов и разрабатываются в ряде стран. Зарубежные безредукторные электроприводы изготавливаются с использованием синхронных двигателей с дорогостоящими постоянными магнитами. Рядом исследовательских центров установлено, что в настоящее время по ряду Европейских стран количество безредукторных электроприводов в жилом секторе составляет около 3%, однако безредукторные электроприводы лифтов получают все большее распространение.

Самым распространенным типом электродвигателей являются асинхронные двигатели (АД). Широкое применение АД объясняется их достоинствами по сравнению с другими типами электродвигателей:

конструктивной простотой и, как следствие, высокой надёжностью и невысокой стоимостью. В нашей стране имеется большой опыт изготовления и применения АД различных типов, поэтому должны найти массовое применение безредукторные электроприводы, выполненные на базе асинхронных двигателей отечественного производства. Их исследование и разработка представляет значительный теоретический и практический интерес.

Цель диссертационной работы – совершенствование технико-экономических показателей лифтовых установок с безредукторным электроприводом, выполненном на базе частотно-управляемого тихоходного асинхронного двигателя, исследование особенностей такого электропривода и разработка методики его расчета. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка математического описания электропривода с тихоходным асинхронным двигателем (ТАД).

2. Анализ особенностей переходных процессов частотно-управляемого безредукторного электропривода с тихоходным асинхронным двигателем.

3. Определение энергетической эффективности безредукторного частотно-управляемого электропривода с ТАД и сопоставление технико-экономических показателей редукторных и безредукторных электроприводов.

4. Экспериментальная проверка особенностей безредукторного частотно-управляемого электропривода с ТАД путем проведения его лабораторных исследований и испытаний на действующих лифтовых установках.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались:

- теория электропривода;
- теория автоматического управления;
- теоретические основы электротехники;
- моделирование средствами персонального компьютера в специализированных программах MatLab и Mathcad;

- экспериментальные исследования (лабораторные и на действующих лифтах).

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена результатами экспериментальных лабораторных исследований и испытаний безредукторного электропривода с ТАД на действующих лифтах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработано математическое описание ТАД (система дифференциальных уравнений, выражения для статических режимов), позволяющее по известным параметрам базового АД рассчитать параметры работы ТАД, изготовляемого из базового путем изменения числа витков обмотки статора;
- выявлены особенности переходных процессов частотно-управляемого безредукторного электропривода с ТАД.

Основной практический результат диссертации состоит в подтверждении положительных свойств безредукторного электропривода с ТАД результатами лабораторных исследований и испытаний на действующих лифтах, а также в разработанном математическом описании ТАД, оказывающемся полезным при расчете и анализе электроприводов на его основе.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседаниях кафедры «Автоматизированного электропривода» Московского Энергетического Института (Технического Университета), докладывались на 16 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано четыре печатных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Количество страниц - 142, иллюстраций - 57, число наименований использованной литературы - 97 на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы.

В первой главе проведен обзор используемых на сегодняшний день электроприводов лифта. Указаны особенности электропривода лифта, поставлены задачи исследований.

Основным типом применяемого электропривода лифта является редукторный с двухскоростным асинхронным двигателем. Вид такой лебедки показан на рис. 1, *а*. Такой электропривод имеет ряд недостатков технико-эксплуатационного характера: производство редукторов – трудоемкий процесс, требующий наличия сложного оборудования; редукторы нуждаются в регулярном техническом обслуживании; потери энергии в редукторе обусловливают ухудшение энергетических показателей электропривода.

Улучшение характеристик лифтов обеспечивает использование регулируемого электропривода. Развитие силовой и информационной электроники способствовало появлению и последующему снижению стоимости преобразователей частоты (ПЧ), что позволило лифтостроительным компаниям использовать регулируемые приводы переменного тока. В 90-е годы XX-го века в пассажирских лифтах наметилась тенденция перехода к регулируемому безредукторному электроприводу, лишенному присущих редукторным электроприводам недостатков.

К основным преимуществам безредукторного электропривода по сравнению с редукторным относятся: отсутствие редуктора, более высокая комфортабельность лифта, уменьшение уровня шума и вибраций, энергосбережение. Безредукторные электроприводы активно развиваются за рубежом. На рис. 1 показаны безредукторные лебедки лифта производства зарубежных компаний OTIS (*б*) и KONE (*в*).

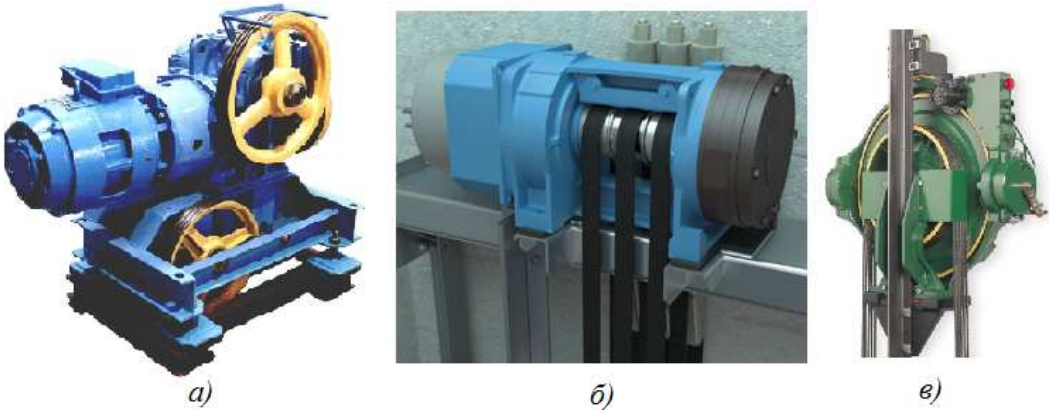

Рис. 1.Редукторные (*а*) и безредукторные (*б*, *в*) лифтовые лебедки

Конструкции зарубежных безредукторных лебедок, как правило, выполнены на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами. В России отсутствует производственная база для их изготовления в массовом масштабе. На сегодняшний день подобные технические решения нашли ограниченное применение в отечественном лифтовом парке.

Асинхронные двигатели длительное время широко используются в различных отраслях промышленности. В нашей стране имеется большой опыт разработки АД различных типов и мощная производственная база для их изготовления. В этом плане представляется, что безредукторные электроприводы, выполненные на базе асинхронных двигателей, весьма перспективны. Исходя из этого сформулирована цель диссертационной работы.

Отечественными разработчиками предложен низкоскоростной (тихоходный) асинхронный двигатель (ТАД), изготавливаемый на базе подходящего по характеристикам типового АД путем увеличения числа витков обмотки статора. Автор данной диссертации принимал активное участие в исследованиях и испытаниях безредукторного электропривода с ТАД на действующих лифтах. На рис. 2 приведен общий вид безредукторной лебедки лифта, выполненной на базе ТАД.

Рис. 2. Безредукторная лебедка лифта с низкоскоростным асинхронным двигателем

Задачи исследований, решение которых позволило достичь поставленной цели, поставлены с учетом следующих положений:

1) Для расчетов статических и динамических характеристик электропривода с ТАД значительный интерес представляет разработка математического описания и методики расчета параметров его схемы замещения на основе параметров базового АД.

2) К электроприводу лифта предъявляются требования по точности остановки и плавности движения кабины. Показатели качества движения,

обеспечиваемые электроприводом, существенно определяются особенностями работы электрической машины при переходных процессах в выбранной структуре управления. Их исследование представляется важным.

3) Около 40% энергетических затрат приходится на здания и сооружения. Доля лифтов в суммарном энергопотреблении здания составляет 3-10 %. Энергосберегающие свойства электропривода лифта являются важными наряду с показателями качества движения и технико-экономическими показателями, их изучение заслуживает серьезного внимания.

4) Использование асинхронного двигателя для построения безредукторного электропривода лифта является нестандартным решением. Представляется важным экспериментальная проверка особенностей безредукторного частотно-управляемого электропривода с ТАД путем проведения лабораторных исследований и испытаний на действующих лифтовых установках.

Во второй главе показано, что типовой АД для безредукторного электропривода использовать нерационально, а эффективнее использовать ТАД. Пояснен принцип выполнения ТАД, получено его математическое описание. Приводятся результаты проведенных автором лабораторных экспериментальных исследований и испытаний на действующих лифтах, проводимых с участием автора, подтверждающих адекватность разработанного математического описания и положительных свойств ТАД.

Рассмотрен вопрос о выборе для безредукторного электропривода типового АД. Для ряда типовых АД проведены расчеты отношения $I/I_{\text{ном}}$ для различных частот питающего напряжения при $M_{\text{с}} = M_{\text{ном}}$. На рис. 3. показаны результаты расчетов. При снижении частоты и, соответственно, скорости в 10 раз токи типовых АД изменяются не очень существенно (на 15-20 %). Установлено, что поскольку безредукторный электропривод работает в зоне только низких частот (до 10 Гц), то типовой АД, рассчитанный на частоту сети, использовать для безредукторного электропривода нерационально (так как при этом требуется ПЧ с мощностью, практически равной номинальной мощности этого двигателя, в то время как механическая мощность значительно снижена).

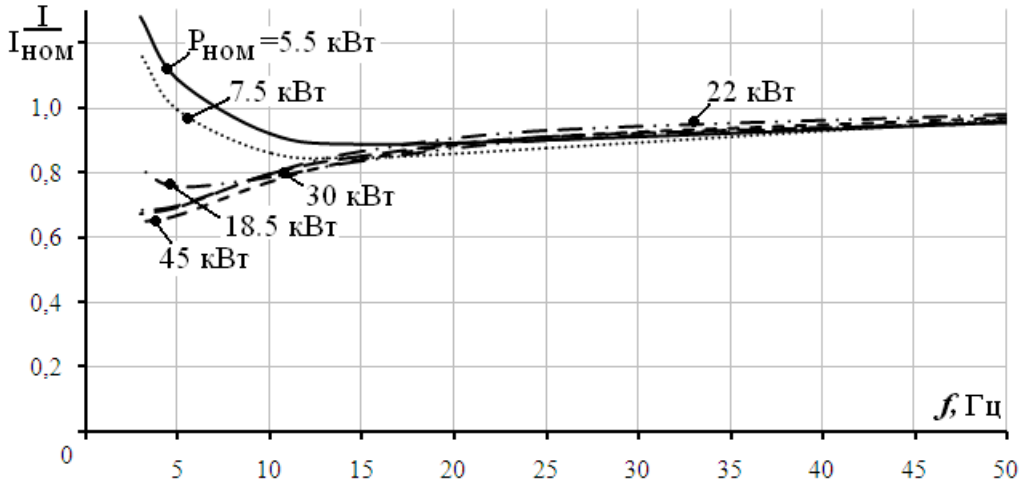

Рис. 3. Изменение тока статора типовых АД при различной частоте

При работе с пониженной частотой, сохранении магнитного потока машины и выполнении условия $M_{\text{с}} = const$ асинхронному двигателю требуется меньшее напряжение, чем при высокой скорости. При пониженных скоростях между требуемым двигателю напряжением и доступным для использования сетевым значением имеется запас. Изменяя номинальное напряжение АД таким образом, чтобы излишний запас по напряжению был минимален, и, ограничивая напряжение на уровне сетевого, можно снизить рабочие токи АД, а соответственно и требуемую мощность ПЧ. Данный принцип положен в основу изготовления ТАД. Изменение номинального напряжения АД возможно путем изменения числа витков обмотки статора. Таким образом, ТАД отличается от подходящего по характеристикам типового АД обмоткой статора (числом витков и диаметром провода). Технология изготовления ТАД мало отличается от технологии изготовления типового АД. Типовой АД, конструкция которого используется при изготовлении ТАД, назван базовым.

В работе показано, что параметры Т-образной схемы замещения ТАД можно определить, используя параметры базового АД, по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} &R_{1,\text{Тад}} = R_{1,б} K_U^2; R'_{2,\text{Тад}} = R'_{2,б} K_U^2; \\ &X_{1,\text{Тад}} = X_{1,б} K_U^2; X'_{2,\text{Тад}} = X'_{2,б} K_U^2; \\ &X_{0,\text{Тад}} = X_{0,б} K_U^2, \end{aligned} \tag{1}$$

где параметры $R_{1,б}$, $R'_{2,б}$, $X_{1,б}$, $X'_{2,б}$, $X_{0,б}$ – параметры Т-образной схемы замещения АД, принятого за базовый; $K_U = \dfrac{U_{\text{Тад}}}{U_б}$ – коэффициент изменения

расчетного номинального напряжения ТАД относительно известного номинального напряжения базового двигателя.

Для анализа электромагнитных процессов в ТАД, выполненных на различное номинальное напряжение, предложено использовать систему дифференциальных уравнений АД в векторной форме в виде:

$$\left.\begin{aligned}
&\overline{U}_1 = \frac{d\overline{\Psi}_1}{dt} + j\omega_{\text{к}}\overline{\Psi}_1 + K_U^2 R_{1,\text{б}}\bar{i}_1;\\
&0 = \frac{d\overline{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_{\kappa} - \omega)\overline{\Psi}_2 + K_U^2 R'_{2,\text{б}};\\
&\overline{\Psi}_1 = K_U^2 L_{s,\text{б}}\bar{i}_1 + K_U^2 M_{0,\text{б}}\bar{i}_2;\\
&\overline{\Psi}_2 = K_U^2 L_{r,\text{б}}\bar{i}_2 + K_U^2 M_{0,\text{б}}\bar{i}_1;\\
&M = \frac{3}{2} p_\tau \omega_{\text{с}} \frac{k_{r,\text{б}}}{K_U^2 X_{s,\text{б}}\sigma_{\text{б}}} \operatorname{Im}(\overline{\Psi}_1 \cdot \overline{\Psi}_2^*);\\
&\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_\tau}{J}(M - M_{\text{с}}),
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

где $\overline{U}_1$ – вектор напряжения, прикладываемого к статору ТАД; $\overline{\Psi}_1$, $\overline{\Psi}_2$ и $\bar{i}_1$, $\bar{i}_2$ – вектора потокосцеплений и токов статора и ротора ТАД; ω – электрическая скорость ТАД; $\omega_{\text{к}}$ – угловая скорость координатных осей. Параметры $R_{1,\text{б}}$, $R'_{2,\text{б}}$, $L_{s,\text{б}}$, $M_{0,\text{б}}$, $X_{s,\text{б}}$, $\sigma_{\text{б}}$ известны и относятся именно к базовому АД (в дальнейшем индексы «б» опущены).

Известными методами из системы уравнений (2) найдены выражения для установившихся режимов ТАД:

для электромагнитного момента:

$$M = \frac{3p_\tau(1-\sigma)\alpha'_r U_{\text{ф}}^2}{K_U^2 \sigma X_s \omega_{\text{с}}} \frac{s}{(\alpha'_s\alpha'_r\sigma - s)^2 + (\alpha'_r + s\alpha'_s)^2}\ ; \qquad (3)$$

для действующего значения тока статора:

$$I_1 = \frac{U_{\text{ф}}}{K_U^2 \sigma X_s}\sqrt{\frac{\alpha_r{}^2 + s^2}{(\alpha'_s\alpha'_r\sigma - s)^2 + (\alpha'_r + s\alpha'_s)^2}}\ , \qquad (4)$$

где $U_{\text{ф}}$ – действующее значение прикладываемого к статору ТАД фазного напряжения, параметры α_r, α'_r, α'_s, σ, X_s – обобщенные параметры базового АД, определяемые по известным параметрам его Т-образной схемы замещения:

$$\alpha_r = \frac{R_2'}{X_r}; \alpha_r' = \frac{\alpha_r}{\sigma}; \alpha_s' = \frac{\alpha_s}{\sigma}; \sigma = 1 - \frac{X_0^2}{X_s X_r}, \quad (5)$$

где $X_s = X_0 + X_1; X_r = X_0 + X_2'$. В работе также получены выражения для действующих значений тока ротора, угла сдвига между фазными векторами тока и напряжения и потребляемой активной мощности ТАД.

Подобная запись системы дифференциальных уравнений и выражений, описывающих установившиеся режимы работы, позволяет производить соответствующие расчеты для ТАД, используя только известные параметры базового двигателя. Это весьма удобно при рассмотрении ряда вопросов использования тихоходных АД.

Для проверки справедливости предложенного математического описания и положительных свойств ТАД проведены лабораторные исследования для двух АД с одинаковой мощностью и различным номинальным напряжением (АД1 – 380 В, АД2 – 127 В). Для этой цели автором разработан и смонтирован лабораторный стенд, состоящий из нагрузочного устройства, исследуемого двигателя и датчика скорости, размещенных на одном валу. Проведены экспериментальные измерения статических механических и электромеханических характеристик АД1 и АД2.

По известным параметрам схемы замещения АД2 рассчитаны его механические и электромеханические характеристики. Характеристики АД1 рассчитаны по известным параметрам АД2 и выражениям (3) (4) при $K_U = 3$. На рис. 4 приведены расчетные механические (*а*, *в*) и электромеханические (*б*, *г*) характеристики (сплошные линии) и экспериментальные значения токов и момента (отмечены крестиком) для АД2 и АД1.

Из рис. 4 видно, что электромеханические характеристики у АД1 (рис. 4, *г*) расположены левее, чем у АД2 (рис. 4, *б*), то есть АД1 развивает такой же момент как и АД2 при меньшем значении тока статора (11,3 Нм при токе 1.9 А вместо 5.7 А), при этом прикладываемое к статору АД1 напряжение не превышает сетевого (380 В линейного значения). Соответствие расчетных механических и электромеханических характеристик АД1 экспериментальным значениям момента и тока подтвердило справедливость полученного математического описания ТАД. Проведенные экспериментальные исследования также подтвердили, что при использовании ТАД рабочие токи снижаются, соответственно уменьшается и требуемая для работы мощность преобразователя частоты.

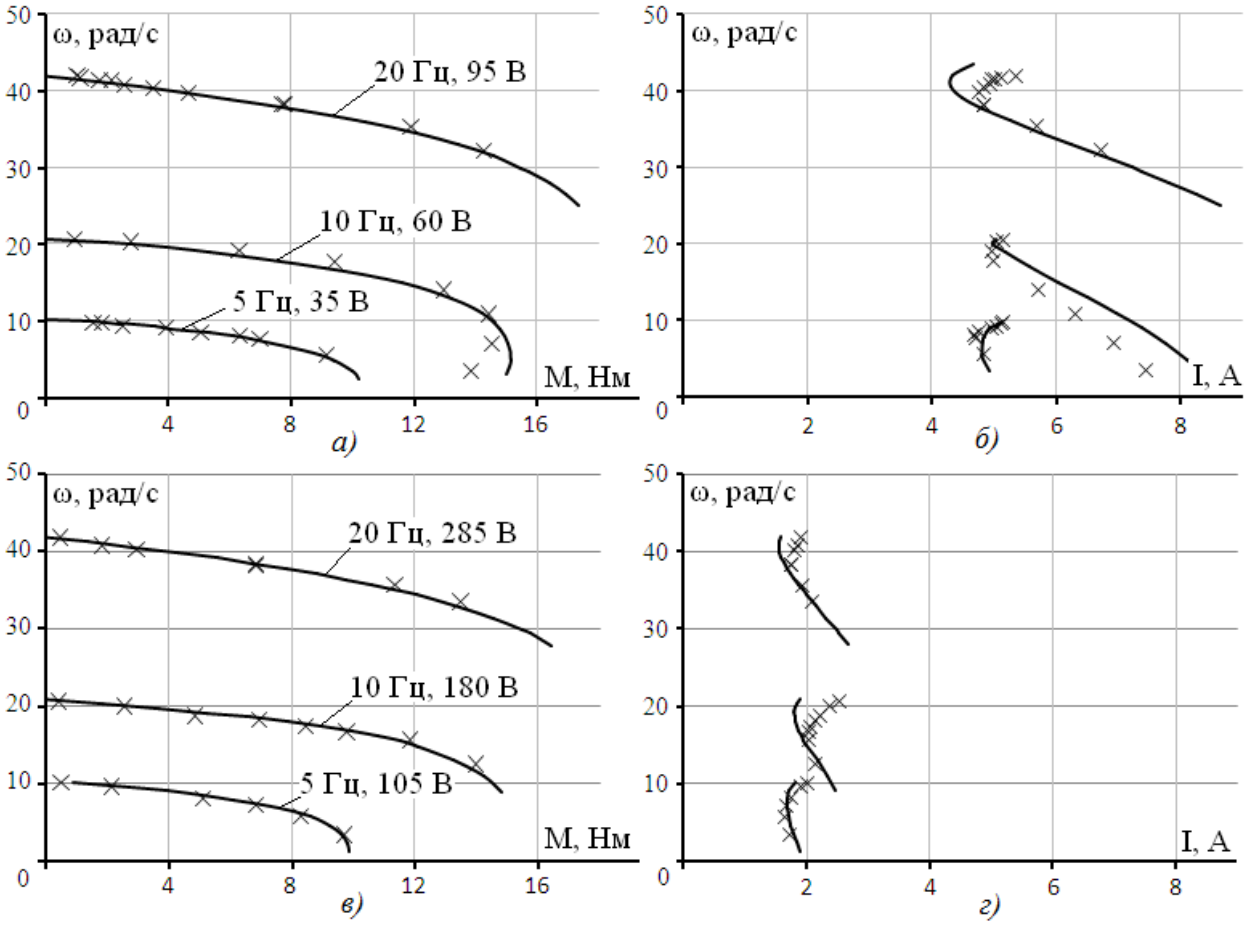

Рис. 4. Расчетные характеристики и экспериментальные точки АД1 (*в, г*) и АД2 (*а, б*)

На базе ТАД разработан безредукторный электропривод для лифтов грузоподъемностью 400 кг с прямым и полиспастным подвесом. Для управления ТАД использована структура векторного управления с обратной связью. На действующих лифтах с участием автора диссертации проведен ряд испытаний (тепловые, измерение переменных электропривода, точности остановки, шумов и вибраций, запаса по моменту). В табл. 1 приведены измеренные на лифте с полиспастным подвесом значения переменных ТАД при частоте вращения 120 об/мин.

Таблица 1. Значения момента, тока и напряжения ТАД

Наименование Переменных	Значения переменных			
$M_с$, Нм	12	78	157	196
$U_л$, В	219	320	365	380
I , А	3,8	8	10	12
$M_с$, Нм	–12	–78	–157	–196
$U_л$, В	265	220	240	240
I , А	5,5	6,8	8	10

При использовании ТАД токи статора и соответственно мощность ПЧ снижаются в 3-4 раза относительно случая использования типового АД (номинальный ток базового АД равен 40 А). Таким образом, обеспечивается минимизация стоимости ПЧ. Проведены тепловые испытания ТАД в наиболее нагруженном цикле работы лифта. В табл. 2 приведены результаты измерений. Установлено, что ТАД имеет запас по нагреву.

Таблица 2. Установившаяся температура обмоток статора ТАД

$M_с$ Нм	$I_ф$ А	ПВ %	Число включений в час	Температура обмоток статора в установившемся режиме, $^\circ$С
80	7,8	90	120	74
145	10,9	60	120	72

Точность остановки, обеспечиваемая безредукторным электроприводом с ТАД, составила ± 4 мм. Для комфортного использования лифта маломобильными группами населения точность остановки должна быть не более ± 20 мм. Уровень звуковой мощности при работе безредукторного электропривода с ТАД не превышает 54 дБА (при работе редукторной лебедки с двухскоростным АД – более 65 дБА, установленная норма – не более 73 дБА). Проведенные исследования на действующих лифтах подтвердили привлекательные свойства ТАД и безредукторного регулируемого электропривода на его основе.

В третьей главе проведены исследования переходных процессов безредукторного электропривода с ТАД, выявлены их особенности.

Система уравнений (2) (как и обычно используемая для АД) является нелинейной, её решение аналитическими методами не представляется возможным. Для исследования переходных процессов в каждом конкретном случае приходится прибегать к численным методам решения дифференциальных уравнений. Однако при условии постоянства скорости удается найти аналитическое решение системы (2) и выражения для потокосцеплений, токов и электромагнитного момента АД. Данный метод ранее использовался научным руководителем данной работы для исследования особенностей переходных процессов АД при номинальной частоте питающего напряжения.

Установлено, что характер переходных процессов потокосцеплений, токов и электромагнитного момента АД характеризуются одними значениями коэффициентов затухания и частот свободных составляющих,

которые не зависят от K_U. ТАД и базовый АД имеют одинаковый характер переходных процессов. Особенности переходных процессов ТАД характерны и для типовых АД при их работе в области низких скоростей. На рис. 5 приведены графики изменения коэффициентов затухания от скорости для ряда АД.

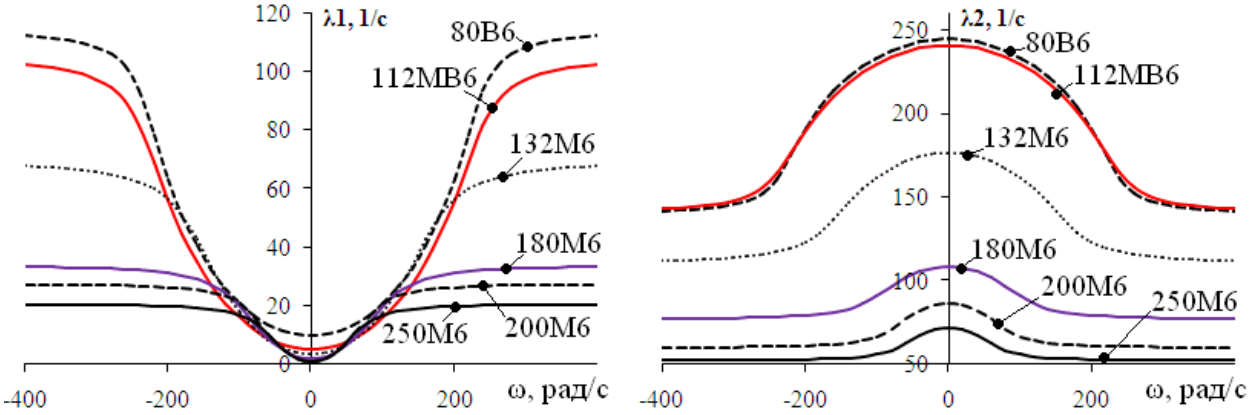

Рис. 5. Коэффициенты затухания АД

При понижении скорости имеет место снижение одного из коэффициентов затухания АД (рис. 5), а с увеличением номинального момента снижаются все его коэффициенты затухания. Основное влияние на переходные процессы оказывает свободная составляющая, затухающая с наименьшим коэффициентом затухания, её частота при той же скорости уменьшается при снижении частоты питающего напряжения. Это обусловливает следующие особенности переходных процессов в безредукторном электроприводе: они характеризуются большим временем затухания, частоты колебаний переменных имеют меньшую величину, что было установлено аналитическими методами.

Для подтверждения отмеченных особенностей с использованием численных методов проведены ряд расчетов переходных процессов (протекающих с изменением скорости), характерных для редукторных и безредукторных электроприводов в различных структурах управления. Для выполнения расчетов разработаны соответствующие модели в программах MatLab и Mathcad.

Расчеты переходных процессов, проведенные для разомкнутой структуры скалярного управления АД, подтвердили увеличение времени переходных процессов и снижение частот колебаний переменных в безредукторном электроприводе с ТАД. Расчеты, проведенные для замкнутой структуры скалярного управления, показали, что обратная связь

снижает амплитуды колебаний переменных, но их продолжительность и частота остаются близкими к наблюдаемым в разомкнутой структуре. Исследования, проведенные численными методами, подтвердили, что переходные процессы в безредукторном электроприводе в структурах скалярного управления (разомкнутых и замкнутых) отличаются большей продолжительностью и меньшей частотой колебаний переменных по сравнению с процессами в редукторном электроприводе.

Для выявления особенностей переходных процессов при векторном управлении АД составлена модель, позволяющая провести расчеты переходных процессов с учетом отличия используемых в системе управления параметров двигателя от их действительных значений. Выявлено, что использование структуры векторного управления позволяет исключить влияние свободных составляющих на переходные процессы редукторного и безредукторного электроприводов при использовании верных параметров АД. Отличия в используемых параметрах АД от действительных значений приводит к отклонению форм переходных процессов от желаемых. Та же ошибка в используемых параметрах оказывает меньшее влияние на форму переходных процессов безредукторного электропривода, чем редукторного.

В четвертой главе проведена экспериментальная оценка снижения энергопотребления безредукторного электропривода с тихоходным асинхронным двигателем по сравнению с широко используемым редукторным электроприводом, выполненном на базе двухскоростного АД.

Вопросам энергосбережения лифтов уделяется серьезное внимание. У лифтов выделяются два характерных режима энергопотребления: движения (перевозки) и ожидания (простоя). Согласно литературным данным в режиме ожидания энергопотребление лифта составляет от 20 до 85 % от суммарного. Для лифтов, работающих в жилых зданиях, эта цифра составляет порядка 70 %, а для лифтов, устанавливаемых в больницах и административных зданиях – 25 %. Энергетические характеристики интенсивно используемых лифтов (больничные и административные здания) в большей степени определяются показателями электропривода, а лифтов с небольшой интенсивностью использования (жилые здания) – мощностью потребителей, задействованных при простое. Важно отметить, что наибольшее количество лифтов установлено в жилых зданиях (в Германии около 78 %, по ряду Европейских стран – 64 %).

Для снижения энергопотребления лифта в режиме ожидания используются отключение неосновных потребителей, энергосберегающее освещение, снижение мощности потребления станцией управления и другие меры. Улучшение энергетических показателей лифта является комплексной задачей и требует рассмотрения множества факторов.

Ввиду случайного характера нагрузки лифтов наиболее точную оценку энергетической эффективности электропривода лифта могут дать длительные наблюдения на различных лифтах. Возрастающее внимание к энергетическим показателям лифтового оборудования заставляет использовать методы, позволяющие с минимальными временными затратами экспериментально определить такие показатели. Проведенный обзор литературы показал, что на сегодняшний день отсутствуют подобные, утвержденные законодательно, отечественные методы. В Европе разработаны две подобных методики. В них предлагается определять энергетические показатели лифта в режимах движения и простоя. В режиме ожидания производится измерение потребляемой мощности спустя 10 минут после поездки. В режиме движения оценка энергоэффективности производится путем измерения потребляемой лифтом энергии, затрачиваемой в определенном контрольном цикле. В качестве контрольного цикла используется перемещение пустой кабины лифта на полную высоту шахты 2 раза с открытием и закрытием дверей кабины на крайних этажах.

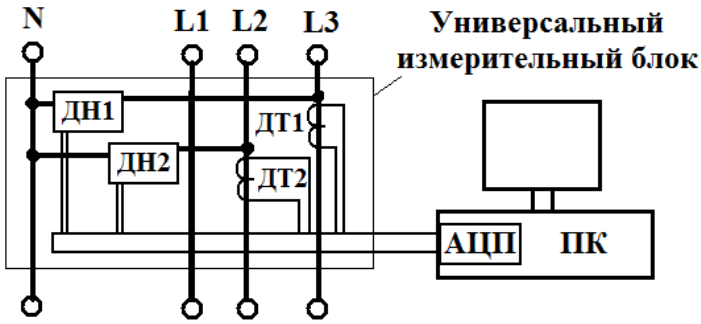

Рис. 6. Измерительный комплекс

Преобразователи частоты с неуправляемым выпрямителем на входе, используемые в безредукторном электроприводе с ТАД, потребляют из сети несинусоидальный ток. Для измерения напряжений и токов использован изготовленный автором измерительный комплекс (рис. 6), состоящий из датчиков тока и напряжения, смонтированных с блоком питания в измерительный блок, и персонального компьютера с платой аналого-цифрового преобразователя.

На действующих лифтах, оснащенных редукторным электроприводом с двухскоростным АД и безредукторным с ТАД, проведены измерения потребляемой электроприводом энергии в контрольном цикле. В том же цикле проведены измерения энергопотребления каждого лифта в целом. На рис. 7 приведены фотографии испытуемых лебедок.

а) *б)*

Рис. 7. Испытуемые электропривода лифта: *а*) редукторный, *б*) безредукторный

Редукторный электропривод с двухскоростным АД имеет значительные броски токов при разгоне и замедлении от номинальной скорости до пониженной, движение кабины с пониженной скоростью осуществляется при повышенном значении тока. В безредукторном электроприводе с ТАД в динамических режимах большие броски тока отсутствуют, движение с пониженной скоростью осуществляется при сниженном значении тока. При работе редукторного электропривода в динамических режимах наблюдаются просадки питающего напряжения. На рис. 8 приведены графики потребления энергии рассматриваемыми электроприводами.

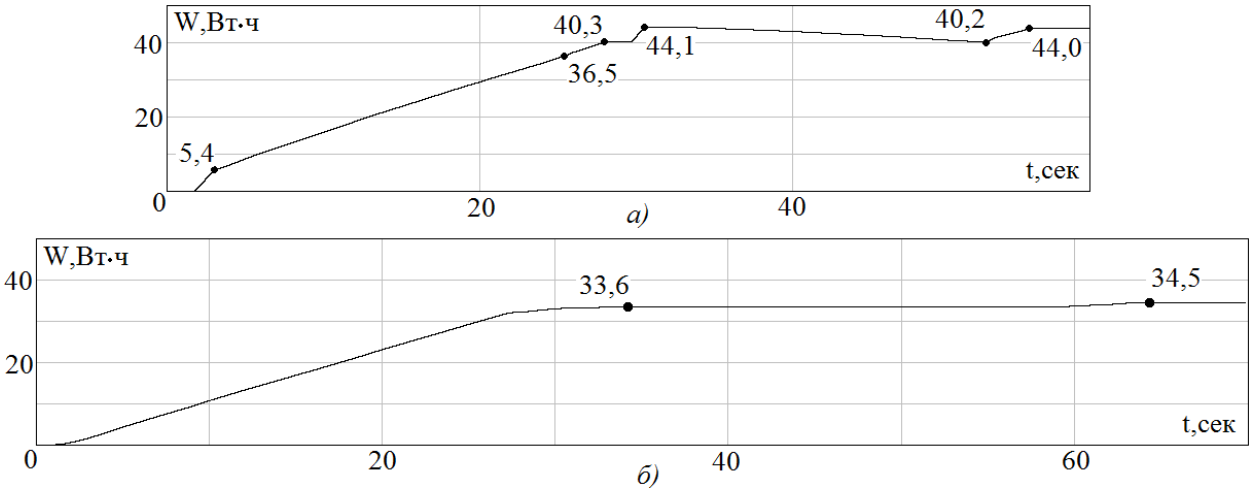

Рис. 8. Потребление энергии редукторным (*а*) и безредукторным (*б*) электроприводами

В кратковременных динамических режимах редукторный электропривод с двухскоростным АД потребляет 40 % энергии (17,7 Вт · ч), безредукторный с ТАД – 12 % (5 Вт · ч). Экономия энергии при использовании безредукторного электропривода связана со снижением энергопотребления в динамически режимах работы. В табл. 3 приведены суммарные затраты энергии электропривода и электрооборудования лифта в рассматриваемом цикле работы.

Таблица 3. Потребляемая электроэнергия, Вт · ч

Тип электропривода	Редукторный ЭП с двухскоростным АД	Безредукторный ЭП с ТАД
Электропривод	43,85	34,66
Электрооборудование	50,00	41,81

В режиме движения более 80 % энергии в лифте потребляется электроприводом. Энергопотребление безредукторного электропривода с ТАД на 21 % меньше, чем редукторного с двухскоростным АД. Отметим, что измерения проведены в цикле, когда кабина перемещалась на полную высоту шахты (7 этажей).

Режим работы лифта, когда кабина перемещается на всю высоту шахты, характеризуется небольшим числом включений в час и на лифте встречается редко. При максимальной интенсивности использования лифта характерны 150 вкл/час при ПВ 50% для жилого здания и 180 вкл/час при ПВ 40 % для административного. Расчетным путем с использованием экспериментальных данных определены энергозатраты электроприводов в режимах с максимальной интенсивностью использования лифта. В табл. 4 приведены результаты расчета.

Таблица 4. Энергопотребление электроприводов при наиболее интенсивном использовании лифта, Вт · ч

Тип электропривода	Безредукторный с ТАД	Редукторный с двухскоростным АД
жилое здание	11,36	26,49
административное здание	6,35	21,78

При максимальной интенсивности использования лифта в жилом здании безредукторный электропривод с ТАД позволяет экономить 57 %, а в административном до 70 % энергии.

В пятой главе проведены расчеты и сопоставление параметров механической части безредукторных электроприводов с ТАД и редукторных на базе двухскоростных АД.

Проведенные расчеты показали, что безредукторный электропривод по сравнению с редукторным имеет значительно больший суммарный момент инерции. Отношение суммарного момента инерции электропривода к моменту инерции двигателя у редукторного электропривода составляет (2,5–6):1. При использовании безредукторных лебедок с ТАД данное отношение составляет (40–60):1 при полиспастном и (100–130):1 при прямом подвесе лифта.

Вклад в суммарный момент инерции лифта от двигателя и вращающихся на его валу масс составляет при использовании редукторной лебедки более 85 % и не более 20 % при использовании безредукторной с ТАД. Таким образом, на разгон поступательно движущихся масс (кабина, противовес, полезный груз) при использовании редукторного электропривода уходит не более 15 % механической энергии, а при использовании безредукторного – более 80 %.

Для оценки снижения затрат энергии в динамических режимах при использовании безредукторного электропривода определены значения суммарной кинетической энергии лифтов при номинальной скорости. Требуемая для разгона лифта механическая энергия при использовании безредукторного электропривода с ТАД меньше (до 5-6 раз), чем при использовании редукторного электропривода с двухскоростным АД, в результате чего электропривод с ТАД выгодно отличается значительно меньшим уровнем энергопотребления в переходных процессах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что безредукторный частотно-управляемый электропривод с тихоходным асинхронным двигателем (ТАД) выгодно отличается минимальными массогабаритными и стоимостными показателями двигателя и преобразователя частоты.

2. Разработано математическое описание ТАД, позволяющее рассчитывать его статические и динамические режимы по известным параметрам базового АД. Обоснованность математического описания подтверждена результатами лабораторных исследований и испытаний безредукторных электроприводов с ТАД на действующих лифтовых установках.

3. Выявлены особенности переходных процессов частотно-управляемого электропривода с ТАД в различных структурах управления, а именно: переходные процессы затухают более длительно и частоты колебаний переменных ниже по сравнению с редукторным электроприводом.

4. Безредукторный электропривод с ТАД выгодно отличается от редукторного электропривода с двухскоростным АД значительно меньшим уровнем энергопотребления в переходных процессах.

5. Установлено, что в зависимости от интенсивности работы лифта в безредукторном электроприводе с ТАД снижается энергопотребление лифта в режиме движения на 20 – 70 % по сравнению с редукторным электроприводом, выполненном с двухскоростным АД.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

[1] **Масандилов Л.Б., Галкин А.А., Новиков С.Е. Безредукторный частотно-управляемый электропривод с низкоскоростным асинхронным двигателем. Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч.3. – С. 83-89.**

[2] Масандилов Л.Б., Галкин А.А., Жолудев И.С., Фумм Г.Я. Асинхронный двигатель для безредукторного частотно-управляемого электропривода // Труды МЭИ. Вып. 684. – М.:Издательство МЭИ, 2009. – С. 4-9.

[3] Галкин А.А. Особенности механических параметров безредукторных лебедок лифта с низкоскоростным асинхронным двигателем// Электропривод и системы управления: Труды МЭИ. Вып. 685.– М.:Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 67-72.

[4] Галкин А.А. Новиков С.Е. Безредукторные электроприводы пассажирского лифта с применением тихоходного асинхронного двигателя // Шестнадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тез. докл. В 3 т. Т. 2. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 126-127.