На правах рукописи

КУРАЕВ НИКОЛАЙ МИХАЙЛОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированного электропривода» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор **Масандилов Лев Борисович**
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханики» ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ» **Беспалов Виктор Яковлевич;**
	кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист «ЛифтАвтоСервис» филиала МГУП «МОСЛИФТ» **Чупрасов Владимир Васильевич**
Ведущая организация:	Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина»

Защита диссертации состоится «7» июня 2013 г. в 14 час. 00 мин. в аудитории М-611 на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 13.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим отправлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д.14, Ученый Совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « 6 » мая 2013 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

40 – 50 % производственных механизмов имеют рабочие органы с поступательным или возвратно-поступательным движением. Несмотря на это, в настоящее время наибольшее применение в приводах таких механизмов имеют электродвигатели вращательного типа, при использовании которых требуется наличие дополнительных механических устройств, осуществляющих преобразование вращательного движения в поступательное: кривошипно-шатунный механизм, винт и гайка, шестерня и рейка и т. п. Во многих случаях данные устройства представляют собой сложные узлы кинематической цепи, характеризующиеся значительными потерями энергии, что усложняет и удорожает привод.

Использование в приводах с поступательным движением рабочего органа вместо двигателя с вращающимся ротором соответствующего ему линейного аналога, который дает непосредственное прямолинейное движение, позволяет исключить передаточный механизм в механической части электропривода. Это решает задачу максимального сближения источника механической энергии – электродвигателя и исполнительного механизма.

Примерами промышленных механизмов, в которых в настоящее время могут быть использованы линейные двигатели, являются: подъемно-транспортные машины, устройства возвратно-поступательного движения, например, насосы, коммутационные аппараты, тележки кранов, двери лифтов и др.

Среди линейных двигателей наиболее простыми по конструкции являются линейные асинхронные двигатели (ЛАД), особенно цилиндрического типа (ЦЛАД), которым посвящено много публикаций. По сравнению с вращающимися асинхронными двигателями (АД) ЦЛАД характеризуются следующими особенностями: разомкнутостью магнитной цепи, приводящей к возникновению продольных краевых эффектов, и значительной сложностью теории, связанной с наличием краевых эффектов.

Применение ЛАД в электроприводах требует знания их теории, которая позволила бы рассчитывать как статические режимы, так и переходные процессы. Однако, к настоящему времени из-за отмеченных особенностей их математическое описание имеет весьма сложный вид, что приводит к значительным трудностям при необходимости проведения ряда расчетов. Поэтому целесообразно использовать упрощенные подходы к анализу электромехани-

ческих свойств ЛАД. Нередко для расчетов электроприводов с ЛАД без доказательств используют теорию, которая свойственна обычным АД. В этих случаях расчеты часто связаны со значительными погрешностями.

Для расчетов электромагнитных жидкометаллических насосов Вольдеком А.И. была разработана теория, основанная на решении уравнений Максвелла. Эта теория послужила основой для появления различных методик расчета статических характеристик ЦЛАД, среди которых можно выделить широко известный метод аналогового моделирования многослойных структур.

Однако, данный метод не позволяет рассчитывать и анализировать динамические режимы, что весьма важно для электроприводов.

Вследствие того, что безредукторные электроприводы с ЦЛАД могут найти широкое применение в промышленности, их исследования и разработка представляют значительный теоретический и практический интерес.

Цель диссертационной работы – развитие теории цилиндрических линейных асинхронных двигателей с использованием метода аналогового моделирования многослойных структур и приложение этой теории к расчетам статических и динамических характеристик электроприводов, а также разработка частотно-управляемого безредукторного электропривода с ЦЛАД для широко распространенных в промышленности автоматических дверей.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Выбор математической модели ЦЛАД и разработка методики определения соответствующих выбранной модели обобщенных параметров ЦЛАД, с использованием которых расчеты статических и динамических характеристик обеспечивают приемлемое совпадение с экспериментами.

2. Разработка методики экспериментального определения параметров ЦЛАД.

3. Анализ особенностей применения и разработка электроприводов по системам ПЧ–ЦЛАД и ТПН–ЦЛАД для дверей лифта.

4. Разработка вариантов схем механизма безредукторного привода раздвижных дверей кабины лифта с ЦЛАД.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электропривода, теоретические основы электротехники, теория электрических машин, в частности метод аналогового моделирования многослойных структур, моделирование и разработка средствами пер-

сонального компьютера в специализированных программах Mathcad и Matlab, экспериментальные лабораторные исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена результатами экспериментальных лабораторных исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- с помощью разработанного способа определения обобщенных параметров низкоскоростного ЦЛАД обосновано его математическое описание в виде системы уравнений, что дает возможность производить различные расчеты статических и динамических характеристик электропривода с ЦЛАД;
- предложен алгоритм экспериментального способа определения параметров АД с вращающимся ротором и ЦЛАД, характеризующийся повышенной точностью обработки результатов экспериментов;
- в результате исследований динамических свойств ЦЛАД выявлено, что переходные процессы у ЦЛАД характеризуются гораздо меньшей колебательностью, чем у АД;
- использование ЦЛАД для безредукторного привода дверей лифта позволяет при простом управлении в системе ПЧ–ЦЛАД формировать плавные процессы открывания и закрывания дверей.

Основной практический результат диссертации состоит в следующем:

- разработан способ определения обобщенных параметров низкоскоростного ЦЛАД, позволяющий производить исследования и расчеты при эксплуатации и разработке электроприводов;
- результаты исследования низкочастотных ЦЛАД подтвердили возможность минимизации требуемой мощности преобразователя частоты при их использовании в безредукторных электроприводах, что улучшает технико-экономические показатели таких электроприводов;
- результаты исследования ЦЛАД, подключенного к сети через преобразователь частоты, показали, что для привода дверей лифта не требуется тормозной резистор и тормозной ключ, так как у ЦЛАД в используемой для работы привода зоне частот отсутствует режим рекуперативного торможения. Отсутствие тормозного резистора и тормозного ключа позволяет снизить стоимость привода дверей лифта с ЦЛАД;

- для одностворчатых и двухстворчатых раздвижных дверей кабины лифта разработана схема механизма безредукторного привода, которая выгодно отличается применением цилиндрического линейного асинхронного двигателя, характеризующегося поступательным движением подвижного элемента, для осуществления поступательного движения створок дверей.

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

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ, в том числе 1 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы. Количество страниц - 146, иллюстраций - 71, число наименований использованной литературы - 92 на 9 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлены конструкции исследуемых ЦЛАД. Описан способ расчета статических характеристик ЦЛАД с использованием метода аналогового моделирования многослойных структур. Рассмотрено развитие безредукторных приводов дверей кабины лифта. Указаны особенности существующих электроприводов дверей лифта, поставлены задачи исследований.

Метод аналогового моделирования многослойных структур основан на решении системы уравнений Максвелла для различных областей линейных асинхронных двигателей. При получении основных расчетных формул принимается допущение о том, что индуктор в продольном направлении считается бесконечно длинным (продольный краевой эффект не учитывается). С помощью этого метода определяются статические характеристики ЦЛАД по формулам:

$$F(s)=\frac{\left[-0,5\operatorname{Re}\left(\dot{E}_{2m\varphi}(s)\dot{H}^{*}_{2mz}(s)\right)\right]2p_{\tau}\tau\pi d_{2}}{v_{0}}; \qquad (1)$$

$$I_{1}(s)=\frac{U_{1}}{\sqrt{\underline{Z}_{\text{ф}}(s)\underline{Z}^{*}_{\text{ф}}(s)}}; \qquad (2)$$

$$\underline{Z}_{\text{ф}}(s)=R_{1}+\frac{9m_{1}w_{\text{ф}}^{2}}{\pi p_{\tau}\tau}\underline{Z}_{\text{вх}}(s), \qquad (3)$$

где d_2 – внешний диаметр вторичного элемента ЦЛАД.

Следует отметить, что расчеты статических характеристик ЦЛАД по формулам (1) и (2) являются громоздкими, т.к. в указанные формулы входят переменные, для определения которых требуется проводить много промежуточных вычислений.

Для двух ЦЛАД с одинаковыми геометрическими данными, но различным числом витков $w_{\text{ф}}$ обмотки индуктора (ЦЛАД 1 – 600, ЦЛАД 2 – 1692) по формулам (1) и (2) осуществлен расчет их механической и электромеханической характеристик при $f_1 = 50$ Гц, $U_1 = 220$ В. Результаты расчетов для ЦЛАД 2 представлены далее на рис. 1.

В нашей стране в большинстве случаев для дверей лифтов используются нерегулируемые электроприводы с относительно сложной механической частью при относительно простой электрической части. Основными недостатками таких приводов являются наличие редуктора и сложной конструкции осуществляющего преобразование вращательного движения в поступательное механического устройства, при работе которых возникает дополнительный шум.

В связи с активным развитием преобразовательной техники наметилась тенденция упрощения кинематики механизмов с одновременным усложнением электрической части привода за счет применения преобразователей частоты, с помощью которых стало возможным формирование желаемых траекторий движения дверей.

Таким образом, в последнее время для дверей современных лифтов начинают применяться регулируемые электроприводы, которые обеспечивают практически бесшумное быстрое и плавное перемещение дверей. В качестве примера можно привести частотно-регулируемый привод дверей российского производства с блоком управления типа БУАД и асинхронным двигателем, вал которого соединен с механизмом дверей через клиноременную пе-

редачу. По мнению ряда специалистов у известных регулируемых приводов, несмотря на их преимущества по сравнению с нерегулируемыми, существуют и недостатки, связанные с наличием ременной передачи и их относительно большой стоимостью.

Во второй главе разработана методика определения обобщенных параметров ЦЛАД, с помощью которой обосновано его математическое описание в виде системы уравнений. Представлены результаты экспериментальных исследований статических характеристик ЦЛАД. Проанализированы характеристики ЦЛАД с составными ВЭ. Исследована возможность изготовления ЦЛАД низкочастотными.

Предлагается следующий подход к исследованию электропривода с ЦЛАД и его математическому описанию:

1) используем полученные с помощью метода аналогового моделирования многослойных структур формулы (1) и (2) для статических характеристик ЦЛАД (механических и электромеханических) и рассчитываем эти характеристики (см. рис. 1);

2) на полученных характеристиках выбираем две точки, для которых фиксируем следующие переменные: электромагнитная сила, ток индуктора и комплексное сопротивление фазы для одной из этих выбранных точек (см. рис. 1);

3) полагаем, что статические характеристики ЦЛАД можно также описать формулами (5) и (6), которые приведены далее и соответствуют установившемуся режиму обычного асинхронного двигателя с вращающимся ротором и получены из его дифференциальных уравнений;

4) попытаемся по двум выбранным точкам найти обобщенные параметры, входящие в указанные формулы (5) и (6) статических характеристик;

5) подставляя найденные обобщенные параметры в указанные формулы (5) и (6), полностью рассчитываем статические характеристики;

6) производим сравнение статических характеристик, найденных в п. 1 и в п. 5 (см. рис. 2). Если эти характеристики достаточно близки друг к другу, то можно утверждать, что математические описания ЦЛАД (4) и АД имеют аналогичный вид;

7) используя найденные обобщенные параметры, можно записать как дифференциальные уравнения ЦЛАД (4), так и вытекающие из них более удобные для расчетов формулы различных статических характеристик.

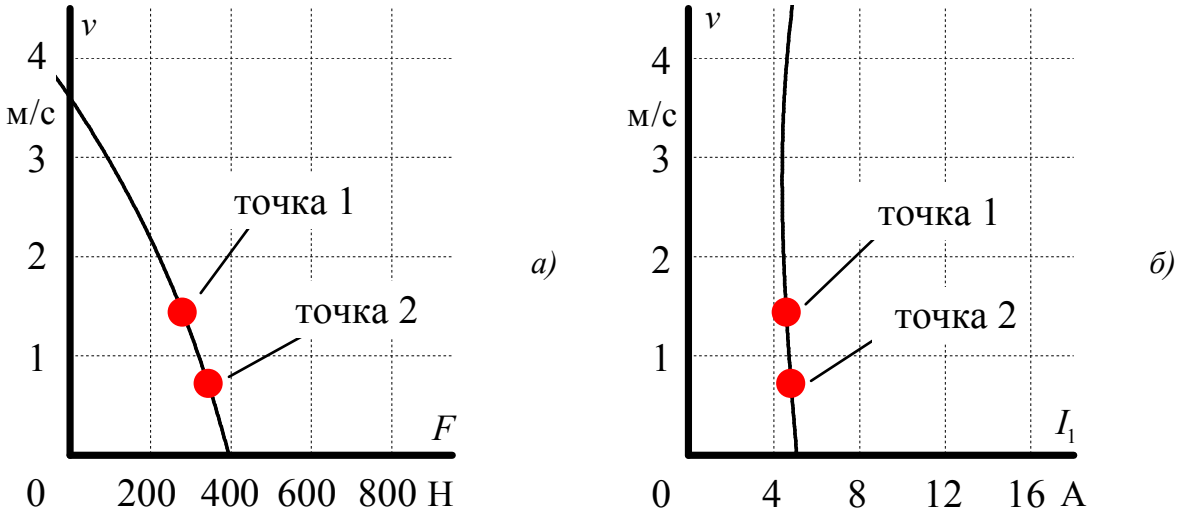


Рис. 1. Механические (*а*) и электромеханические (*б*) характеристики ЦЛАД 2

Приближенное математическое описание ЦЛАД, которое аналогично соответствующему описанию обычных АД, в векторной форме и в синхронной системе координат имеет следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d\overline{\Psi}_1}{dt} = \overline{u}_1 - \lambda'_s\overline{\Psi}_1 + \lambda'_s k_r\overline{\Psi}_2 - j\omega_1\overline{\Psi}_1;\\
&\frac{d\overline{\Psi}_2}{dt} = -\lambda'_r\overline{\Psi}_2 + \lambda'_r k_s\overline{\Psi}_1 - j(\omega_1 - \Omega)\overline{\Psi}_2;\\
&\overline{\Psi}_1 = L_s(\overline{i}_1 + k_s\overline{i}_2);\\
&\overline{\Psi}_2 = L_r(k_r\overline{i}_1 + \overline{i}_2);\\
&F = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau}\frac{k_r}{L_s\sigma}\operatorname{Im}\left(\overline{\Psi}_1\overline{\Psi}_2^*\right);\\
&\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\pi}{\tau m}(F - F_c).
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Используя результаты решения системы (4) в установившихся режимах (при $v = \Omega\tau/\pi = \text{const}$), получены формулы для статических характеристик:

$$F = \frac{3U_1^2(1-\sigma)\pi}{L_s\sigma\tau}\cdot\frac{s\lambda'_r\omega_1}{(\lambda'_s\lambda'_r\sigma - s\omega_1^2)^2 + (s\lambda'_s + \lambda'_r)^2\omega_1^2}; \qquad (5)$$

$$I_1 = \frac{U_1}{L_s\sigma}\sqrt{\frac{\lambda_r^2 + s^2\omega_1^2}{(\lambda'_s\lambda'_r\sigma - s\omega_1^2)^2 + (s\lambda'_s + \lambda'_r)^2\omega_1^2}}. \qquad (6)$$

Для нахождения обобщенных параметров исследуемых ЦЛАД, входящих в (5) и (6), предлагается применить известный способ экспериментального определения обобщенных параметров Т-образной схемы замещения для АД с вращающимся ротором по переменным двух установившихся режимов. Из выражений (5) и (6) следует:

$$\frac{F}{I_1^2} = \frac{3\pi(1-\sigma)\lambda_r\omega_1 L_s}{\tau}\frac{s}{\lambda_r^2 + s^2\omega_1^2} = k_{FI}\frac{s}{\lambda_r^2 + s^2\omega_1^2}, \qquad (7)$$

где k_{FI} – коэффициент, не зависящий от скольжения. Записывая отношения вида (7) для двух произвольных скольжений s_1 и s_2 и поделив их друг на друга, получаем:

$$\frac{F(s_1)}{I_1^2(s_1)} \Big/ \frac{F(s_2)}{I_1^2(s_2)} = a_{12} = \frac{\lambda_r^2 + s_2^2\omega_1^2}{\lambda_r^2 + s_1^2\omega_1^2}\frac{s_1}{s_2}. \qquad (8)$$

При известных значениях электромагнитных сил и токов индуктора для двух скольжений из (8) определяется обобщенный параметр λ_r:

$$\lambda_r = \omega_1\sqrt{s_1 s_2 \frac{a_{12}s_1 - s_2}{s_1 - a_{12}s_2}}. \qquad (9)$$

При дополнительно известном для одного из скольжений, например s_1, значении комплексного сопротивления $\underline{Z}_{\text{ф}}(s_1)$ схемы замещения ЦЛАД, формула для которого может быть также получена в результате решения системы (4) в установившихся режимах, обобщенные параметры σ и λ_s вычисляются следующим образом:

$$\sigma = 1 - \lambda_s \frac{(\lambda_r^2 + s_1^2\omega_1^2)(\mathrm{Re}\left[\underline{Z}_{\text{ф}}(s_1)\right] - R_1)}{R_1\lambda_r s_1\omega_1^2}; \qquad (10)$$

$$\lambda_s = \frac{R_1\lambda_r\omega_1}{s_1\omega_1(\mathrm{Re}\left[\underline{Z}_{\text{ф}}(s_1)\right] - R_1) + \lambda_r\,\mathrm{Im}\left[\underline{Z}_{\text{ф}}(s_1)\right]}. \qquad (11)$$

Значения электромагнитных сил и токов индуктора для двух скольжений, а также комплексное сопротивление схемы замещения ЦЛАД для одного из скольжений, входящие в (9), (10) и (11), предлагается определять методом аналогового моделирования многослойных структур по (1), (2) и (3).

С использованием указанных формул (9), (10) и (11) рассчитаны обобщенные параметры ЦЛАД 1 и ЦЛАД 2, с помощью которых далее по формулам (5) и (6) при $f_1 = 50$ Гц, $U_1 = 220$ В получены их механические и электромеханические характеристики (для ЦЛАД 2 представлены кривыми *2* на рис. 2). Также на рис. 2 приведены статические характеристики ЦЛАД 2, определенные методом аналогового моделирования многослойных структур (кривые *1*).

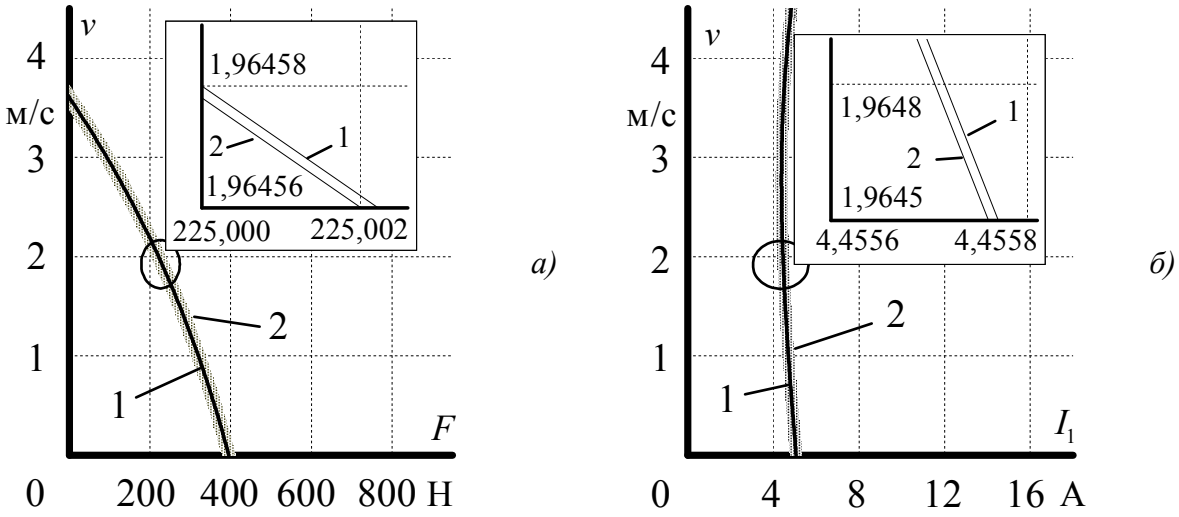


Рис. 2. Механические (*а*) и электромеханические (*б*) характеристики ЦЛАД 2

Из графиков на рис. 2 видно, что кривые *1* и *2* практически совпадают друг с другом, откуда следует, что математические описания ЦЛАД и АД имеют аналогичный вид. Поэтому при дальнейших исследованиях возможно использовать полученные обобщенные параметры ЦЛАД, а также более простые и удобные формулы для расчетов характеристик ЦЛАД. Обоснованность использования предложенного метода для расчета параметров ЦЛАД также дополнительно проверена экспериментальным путем.

Проанализирована возможность изготовления ЦЛАД низкочастотными, т.е. рассчитанными на повышенное напряжение и изготовленными с повышенным числом витков обмотки индуктора. На рис. 3 построены статические характеристики ЦЛАД 1 (при $f_1 = 10$ Гц, $U_1 = 55$ В), ЦЛАД 2 (при $f_1 = 10$ Гц, $U_1 = 87$ В) и низкочастотного ЦЛАД (при $f_1 = 10$ Гц и $U_1 = 220$ В, кривые *3*), у которого число витков обмотки индуктора в 2,53 раза больше, чем у ЦЛАД 2.

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что при одинаковых механических характеристиках рассматриваемых ЦЛАД в первом квадранте ЦЛАД 2 имеет более чем в 3 раза меньший ток индуктора, чем ЦЛАД 1, а низкочастотный ЦЛАД – в 2,5 раза, чем ЦЛАД 2. Таким образом, получается, что использование низкочастотного ЦЛАД в безредукторном электроприводе позволяет минимизировать требуемую мощность преобразователя частоты, улучшая тем самым технико-экономические показатели электропривода.

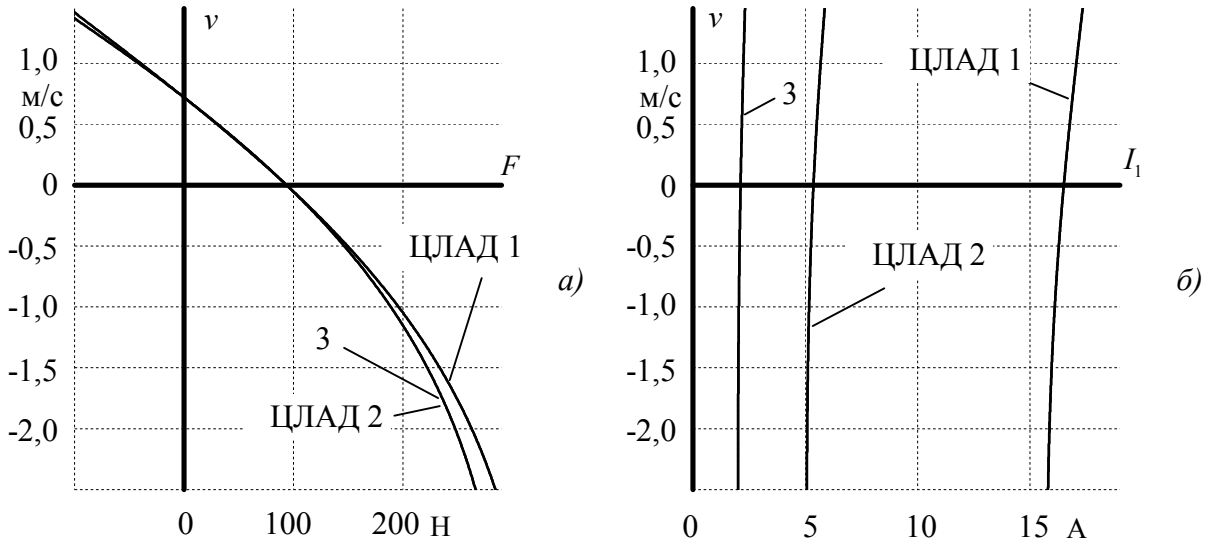


Рис. 3. Механические (*а*) и электромеханические (*б*) характеристики ЦЛАД 1, ЦЛАД 2 и низкочастотного ЦЛАД при 10 Гц

<u>В третьей главе</u> разработан способ экспериментального определения обобщенных параметров ЦЛАД, который реализуется простым способом при неподвижном ВЭ и позволяет определить параметры ЦЛАД, геометрические данные которого неизвестны. Приведены результаты расчетов обобщенных параметров ЦЛАД и обычного АД с помощью указанного способа.

В опыте, схема которого изображена на рис. 4, обмотки двигателя (АД или ЦЛАД) подключаются к источнику постоянного тока. После замыкания ключа *К* токи в обмотках изменяются во времени от начального значения, определяемого параметрами схемы, до нуля. При этом зависимость тока в фазе *А* от времени фиксируется с помощью датчика тока *ДТ* и, например, специализированной платы *L-CARD L-791*, установленной в персональном компьютере.

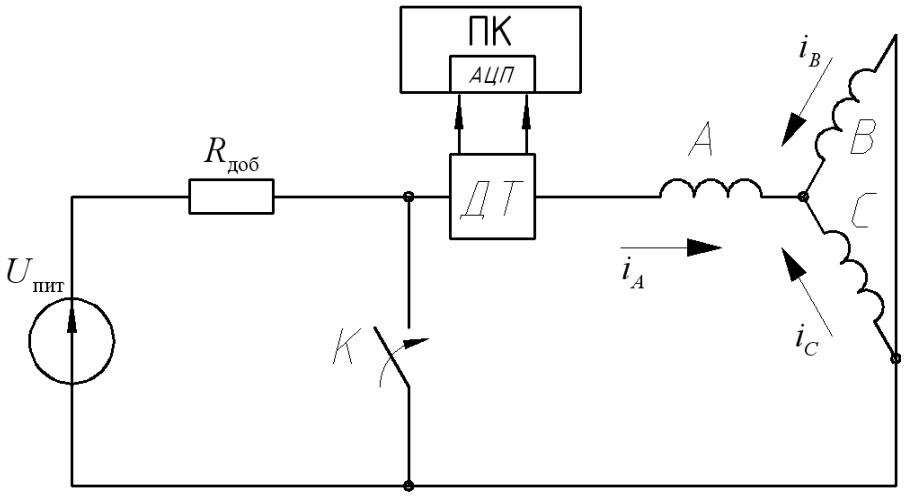


Рис. 4. Схема проведения опыта для определения параметров АД или ЦЛАД

В результате математических преобразований получена формула для зависимости спадания тока в фазе ЦЛАД, которая имеет вид:

$$i_A(t) = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{доб}} + 1{,}5R_1}\left(\frac{p_1 + \lambda'_r}{p_1 - p_2}e^{p_1 t} + \frac{p_2 + \lambda'_r}{p_2 - p_1}e^{p_2 t}\right), \qquad (12)$$

где p_1, p_2 – константы, связанные с обобщенными параметрами λ'_s, λ'_r и σ ЦЛАД или АД следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= \frac{-(\lambda'_s + \lambda'_r) + \sqrt{(\lambda'_s + \lambda'_r)^2 - 4\lambda'_s\lambda'_r\sigma}}{2}; \\ p_2 &= \frac{-(\lambda'_s + \lambda'_r) - \sqrt{(\lambda'_s + \lambda'_r)^2 - 4\lambda'_s\lambda'_r\sigma}}{2}. \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

Из формул (12) и (13) следует, что вид переходного процесса спадания тока ЦЛАД зависит только от обобщенных параметров λ'_s, λ'_r и σ.

Для определения обобщенных параметров ЦЛАД или АД по экспериментальной кривой спадания тока предлагается на ней выделить три равноудаленных друг от друга момента времени t_1, t_2 и t_3 и зафиксировать соответствующие значения токов. В этом случае с учетом (12) и (13) становится возможным составить систему из трех алгебраических уравнений с тремя неизвестными – λ'_s, λ'_r и σ:

$$\left.\begin{aligned} i_A(t_1) &= \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{доб}} + 1{,}5R_1}\left(\frac{p_1 + \lambda'_r}{p_1 - p_2}e^{p_1 t_1} + \frac{p_2 + \lambda'_r}{p_2 - p_1}e^{p_2 t_1}\right); \\ i_A(t_2) &= \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{доб}} + 1{,}5R_1}\left(\frac{p_1 + \lambda'_r}{p_1 - p_2}e^{p_1 t_2} + \frac{p_2 + \lambda'_r}{p_2 - p_1}e^{p_2 t_2}\right); \\ i_A(t_3) &= \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{доб}} + 1{,}5R_1}\left(\frac{p_1 + \lambda'_r}{p_1 - p_2}e^{p_1 t_3} + \frac{p_2 + \lambda'_r}{p_2 - p_1}e^{p_2 t_3}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

решение которой целесообразно получить численным способом, например методом Левенберга-Марквардта.

Эксперименты по определению обобщенных параметров АД и ЦЛАД были проведены для двух двигателей: АД 5А90L6КУ3 (1,1 кВт) и ЦЛАД 2. На рис. 5 приведены теоретические и экспериментальные кривые спадания тока ЦЛАД 2.

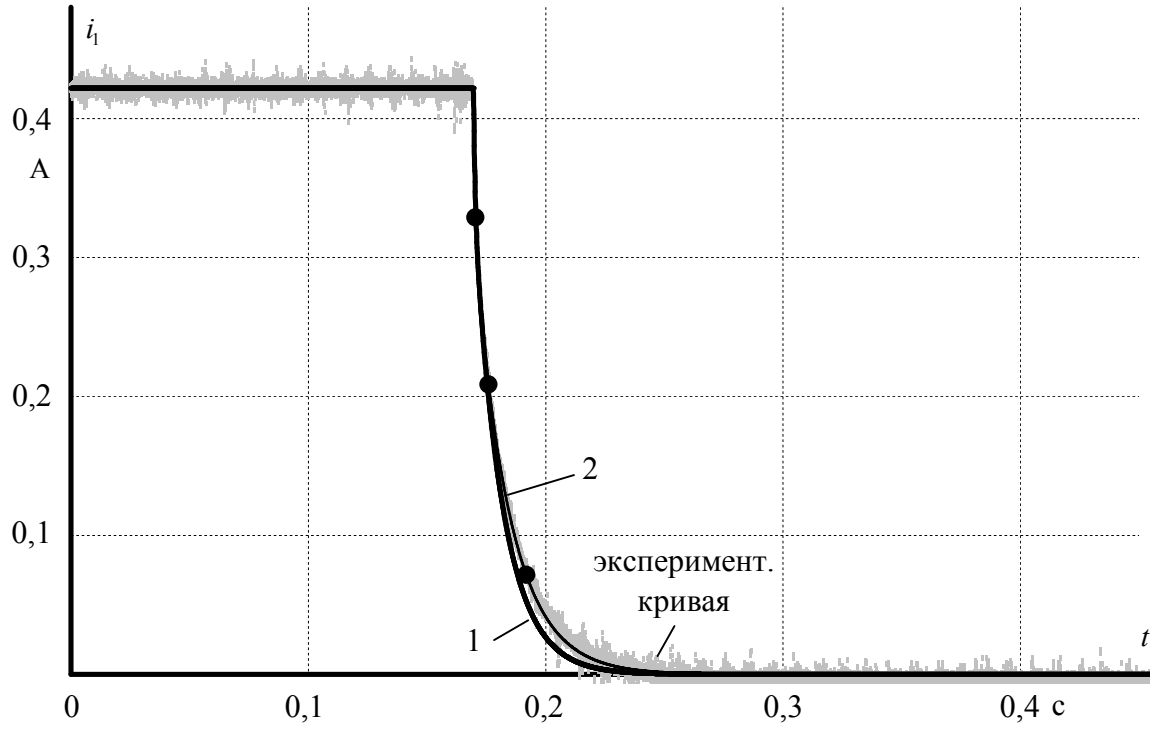


Рис. 5. Кривые спадания тока ЦЛАД 2: *1* – кривая, рассчитанная по обобщенным параметрам, которые получены во второй главе; *2* – кривая, рассчитанная по обобщенным параметрам, которые получены в результате их экспериментального определения

Механические и электромеханические характеристики исследуемых двигателей, рассчитанные с использованием различных вариантов (теоретических и экспериментальных) обобщенных параметров располагаются близко друг к другу, что еще раз подтверждает адекватность предложенного математического описания для ЦЛАД.

В четвертой главе выявлены особенности характера переходных процессов в ЦЛАД. Разработан и исследован электропривод по системе ПЧ–ЦЛАД для дверей лифта.

Для качественной оценки особенностей характера переходных процессов в ЦЛАД использован известный метод, заключающийся в анализе коэффициентов затухания, характеризующих зависимости переменных АД с вращающимся ротором при постоянной скорости.

Наибольшее влияние на скорость затухания (колебательность) переходных процессов переменных ЦЛАД или АД имеет наименьший коэффициент затухания λ_1. На рис. 6 изображены рассчитанные зависимости коэффициентов затухания λ_1 от электрической скорости Ω для двух ЦЛАД (ЦЛАД 1 и ЦЛАД 2) и двух АД (4АА56В4У3 (180 Вт) и 4А71А4У3 (550 Вт)).

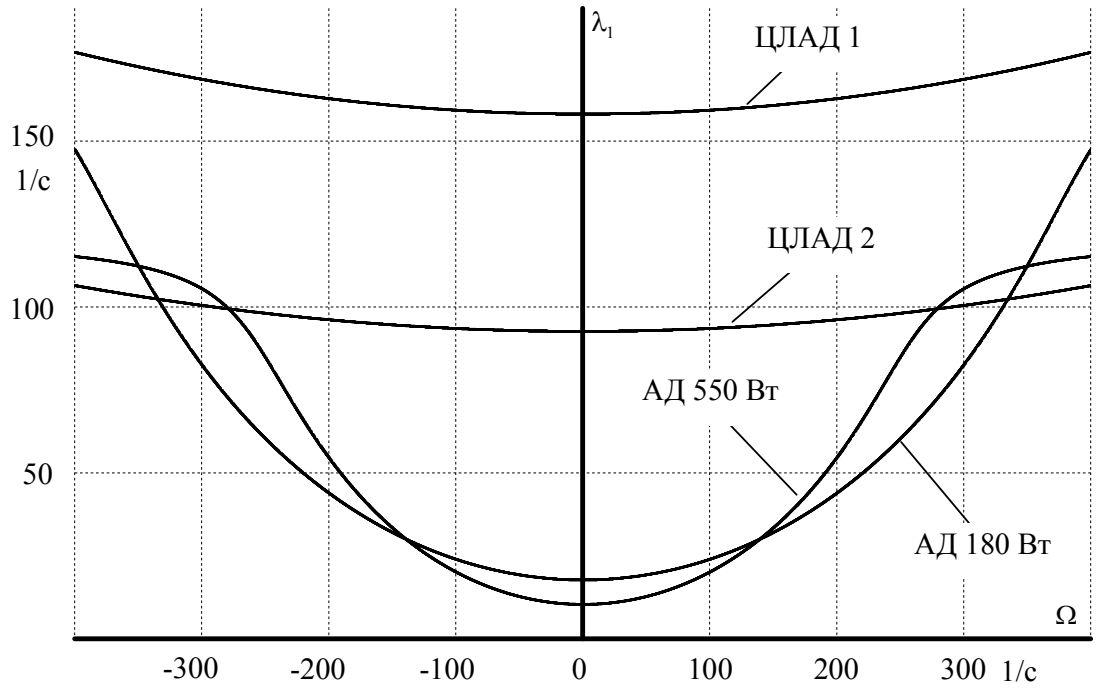


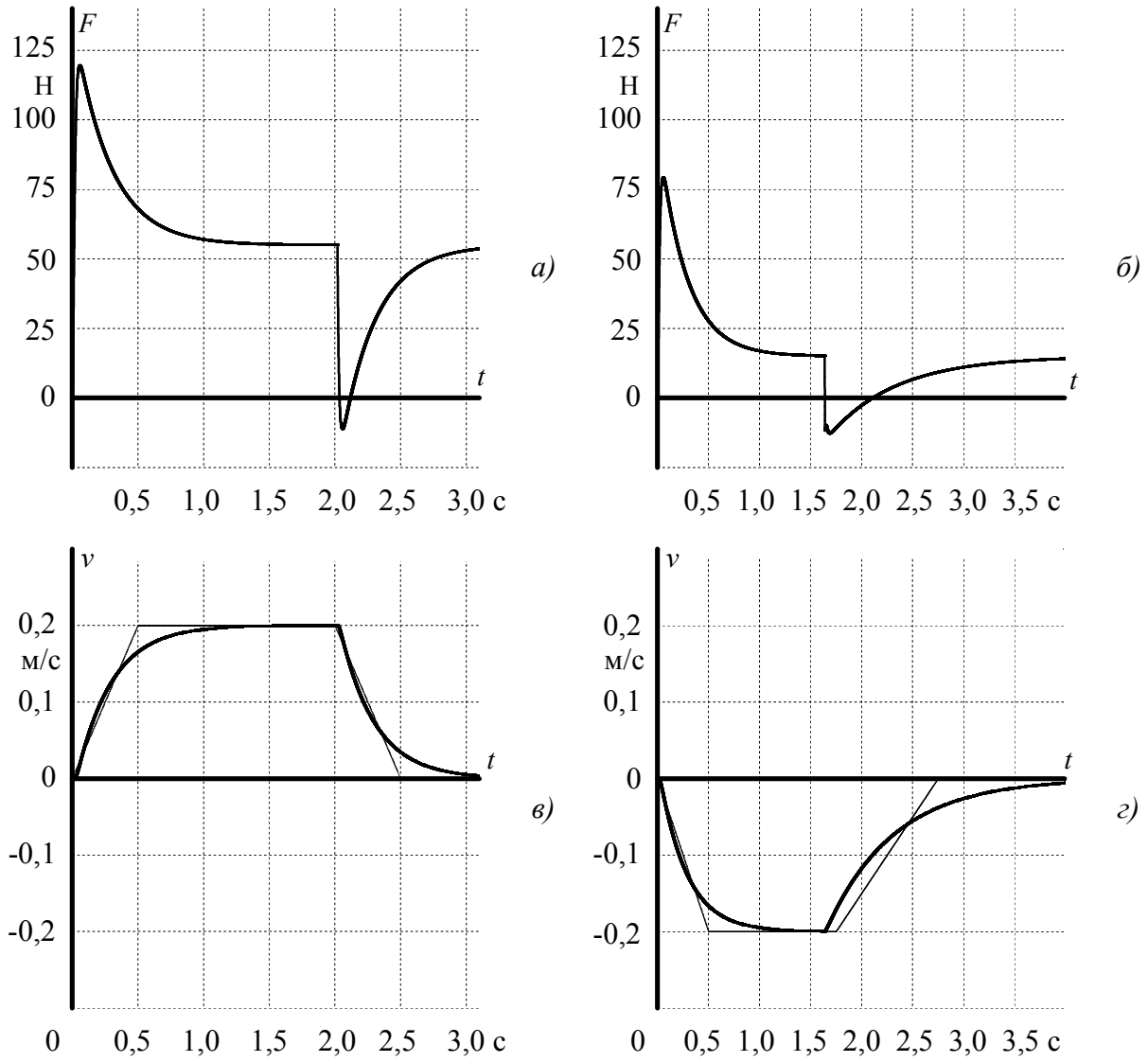
Рис. 6. Зависимости наименьшего коэффициента затухания λ_1 для ЦЛАД и АД от электрической скорости

Из приведенных на рис. 6 зависимостей видно, что коэффициенты затухания ЦЛАД практически не зависят от скорости в отличие от коэффициентов затухания рассматриваемых АД, для которых λ_1 при нулевой скорости в 5 – 10 раз меньше, чем при номинальной. Также следует отметить, что у двух рассмотренных АД значения коэффициентов затухания λ_1 при низких скоростях существенно ниже, чем у ЦЛАД 1 (в 9 – 16 раз) или ЦЛАД 2 (в 5 – 9 раз). В связи со сказанным, можно предположить, что реальные переходные процессы у ЦЛАД характеризуются гораздо меньшей колебательностью, чем у АД.

Для проверки сделанного предположения о меньшей колебательности реальных переходных процессов в ЦЛАД по сравнению с АД осуществлен ряд численных расчетов прямых пусков ЦЛАД 2 и АД (550 Вт). Полученные зависимости момента, усилия, скорости и тока АД и ЦЛАД от времени, а также динамические механические характеристики подтверждают высказанное ранее предположение о том, что переходные процессы ЦЛАД характеризуются гораздо меньшей колебательностью, чем у АД, из-за значительного отличия их наименьших коэффициентов затухания (рис. 6). При этом динамические механические характеристики ЦЛАД меньше отличаются от статических, чем для АД с вращающимся ротором.

Для типового лифта (с проемом 800 мм) проанализирована возможность использования в качестве приводного двигателя механизма дверей

лифта низкочастотного ЦЛАД. По отзывам специалистов для типовых лифтов с шириной проема 800 мм статические усилия при открывании и закрывании дверей отличаются друг от друга: при открывании составляют порядка 30 – 40 Н, а при закрывании – порядка 0 – 10 Н. Т.к. переходные процессы у ЦЛАД имеют значительно меньше колебаний по сравнению с АД, рассмотрена реализация движения створок дверей с помощью низкочастотного ЦЛАД за счет переключений на соответствующие механические характеристики, по которым ЦЛАД разгоняется или тормозится до заданной скорости. В соответствии с выбранными механическими характеристиками низкочастотного ЦЛАД осуществлен расчет его переходных процессов. В расчетах принято, что суммарная масса электропривода, определяемая массами ВЭ ЦЛАД и дверями кабины и шахты типового лифта (с проемом 800 мм), составляет 100 кг. Полученные графики переходных процессов представлены на рис. 7.



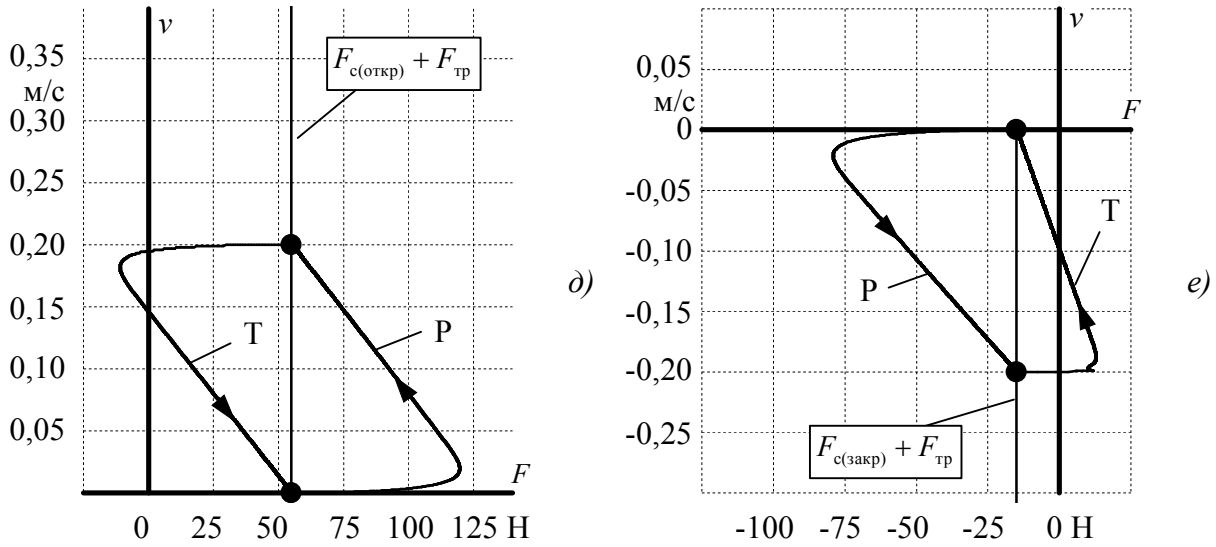


Рис. 7. Переходные процессы низкочастотного ЦЛАД при открывании (*а*, *в*, *д*) и закрывании (*б*, *г*, *е*) дверей лифта: *а*, *б* – $F(t)$; *в*, *г* – $v(t)$; *д*, *е* – динамические механические характеристики

Характеристика *P* обеспечивает разгон привода до установившейся скорости 0,2 м/с, а характеристика *T* обеспечивает торможение с установившейся скорости до нуля. Рассмотренный вариант управления ЦЛАД для открывания и закрывания дверей показывает, что использование ЦЛАД для привода дверей обладает рядом преимуществ (плавные переходные процессы при относительно простом управлении; отсутствие дополнительных устройств, осуществляющих преобразование вращательного движения в поступательное и др.) по сравнению с использованием обычных АД и поэтому представляет значительный интерес.

Привод дверей кабины лифта с обычными АД или ЦЛАД, как было отмечено выше, характеризуется разными значениями сил сопротивления при открывании и закрывании дверей. При этом приводная электрическая машина может работать как в двигательном, так и тормозном режимах в процессе открывания и закрывания дверей лифта. В диссертации проведен анализ возможности отдачи энергии в сеть при работе ЦЛАД в тормозных режимах. Показано, что у ЦЛАД 2 в большом диапазоне частот вообще отсутствует режим рекуперативного торможения. Приведена формула для определения граничной частоты, ниже которой отсутствует генераторный режим с отдачей электроэнергии в сеть у АД и ЦЛАД. Проведенные исследования энергетических режимов работы ЦЛАД позволяют сделать важный вывод: при использовании подключенного к сети через преобразователь частоты ЦЛАД для привода дверей лифта не требуется тормозной резистор и тормозной

ключ. Отсутствие тормозного резистора и тормозного ключа позволяет снизить стоимость привода дверей лифта с ЦЛАД.

В пятой главе проведен обзор существующих приводов дверей лифта. Разработаны варианты схем механизма безредукторного привода раздвижных дверей лифта с ЦЛАД.

Для одностворчатых и двухстворчатых раздвижных дверей кабины лифта предлагается использовать разработанный безредукторный привод с ЦЛАД. Схема механизма такого привода в случае одностворчатых дверей изображена на рис. 8, *а*, в случае двухстворчатых дверей – на рис. 8, *б*.

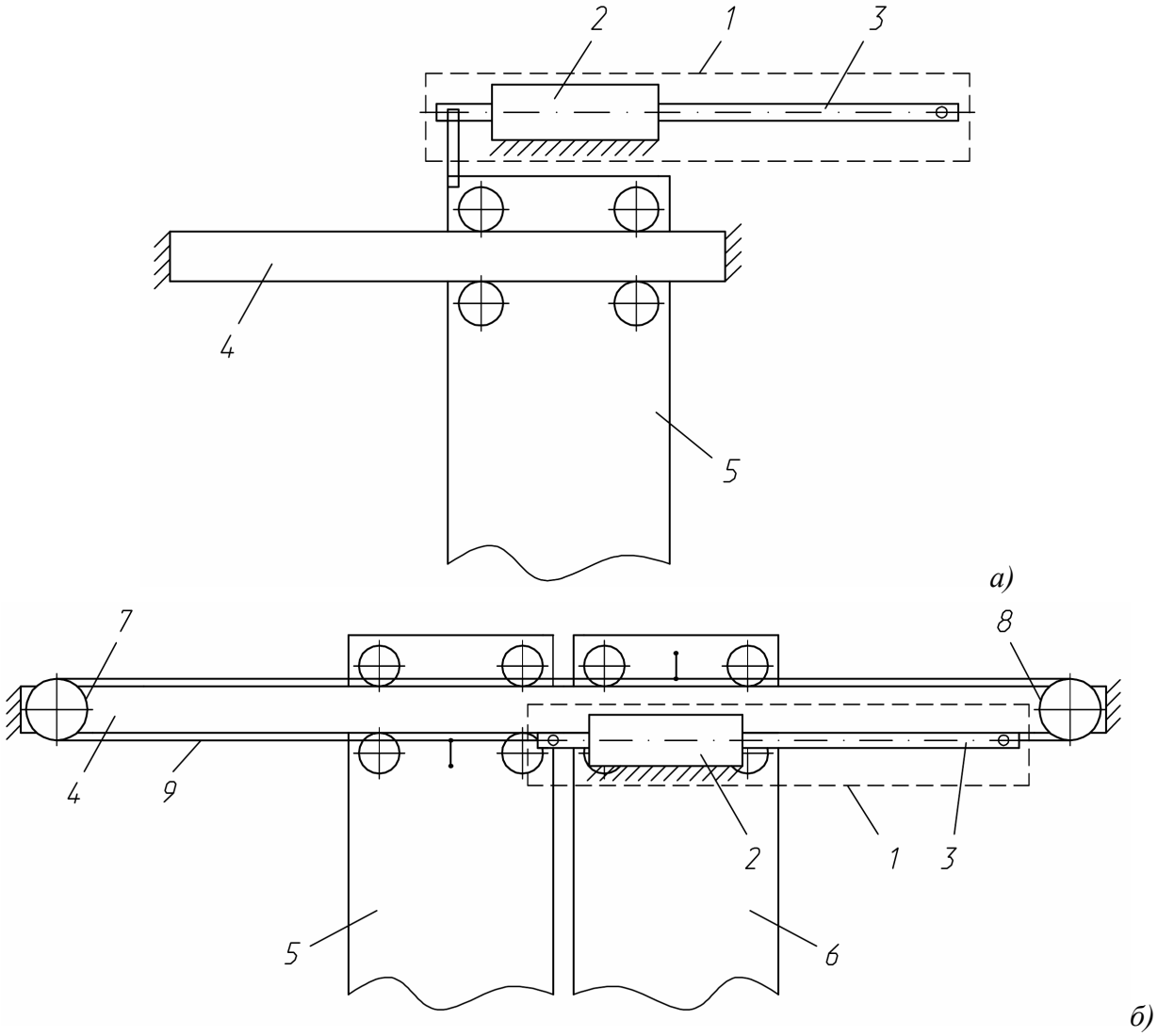


Рис. 8. Схемы механизма привода раздвижной одностворчатой (*а*) и двухстворчатой (*б*) двери кабины лифта с ЦЛАД: *1* – ЦЛАД, *2* – индуктор ЦЛАД, *3* – вторичный элемент ЦЛАД, *4* – опорная линейка, *5*, *6* – створки двери, *7*, *8* – блоки канатной системы, *9* – отрезок каната

Предлагаемые технические решения позволяют создавать безредукторные приводы раздвижных одностворчатых или двухстворчатых дверей, в ча-

стности, кабины лифта, которые характеризуются высокими технико-экономическими показателями, а также надежной и недорогой эксплуатацией при использовании для формирования поступательного движения створок двери простого и относительно недорогого цилиндрического линейного электродвигателя с поступательным движением подвижного элемента.

По предложенным вариантам безредукторных приводов одностворчатых и двухстворчатых раздвижных дверей с ЦЛАД получен патент на полезную модель № 127056.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения обобщенных параметров, входящих в дифференциальные уравнения ЦЛАД, которая основана на расчетах с использованием метода аналогового моделирования многослойных структур и способа определения переменных АД по показателям двух его установившихся режимов.

2. С помощью разработанного способа определения обобщенных параметров низкоскоростного ЦЛАД обосновано его математическое описание в виде системы уравнений, что дает возможность производить различные расчеты статических и динамических характеристик электропривода с ЦЛАД.

3. Использование низкочастотного ЦЛАД в безредукторном электроприводе позволяет минимизировать требуемую мощность преобразователя частоты, что улучшает технико-экономические показатели электропривода.

4. Предложен способ экспериментального определения обобщенных параметров ЦЛАД, характеризующийся повышенной точностью обработки результатов экспериментов.

5. Использование ЦЛАД для безредукторного привода дверей лифта позволяет при простом управлении в системе ПЧ–ЦЛАД формировать плавные процессы открывания и закрывания дверей. Для реализации желаемых процессов необходимо применение относительно недорогого преобразователя частоты, обладающего минимальным набором требуемых функциональных возможностей.

6. При использовании ЦЛАД, подключенного к сети через преобразователь частоты, для привода дверей лифта не требуется тормозной резистор и тормозной ключ, так как у ЦЛАД в используемой для работы привода зоне частот отсутствует режим рекуперативного торможения. Отсутствие тормоз-

ного резистора и тормозного ключа позволяет снизить стоимость привода дверей лифта с ЦЛАД.

7. Для одностворчатых и двухстворчатых раздвижных дверей, преимущественно, кабины лифта разработана схема механизма безредукторного привода, которая выгодно отличается применением цилиндрического линейного асинхронного двигателя, характеризующегося поступательным движением подвижного элемента, для осуществления поступательного движения створок дверей. По предложенным вариантам безредукторных приводов одностворчатых и двухстворчатых раздвижных дверей с ЦЛАД получен патент на полезную модель № 127056.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. **Масандилов Л.Б., Новиков С.Е., Кураев Н.М. Особенности определения параметров асинхронного двигателя при частотном управлении. // Вестник МЭИ, №2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 54-60.**
2. Патент на полезную модель № 127056. Масандилов Л.Б., Кураев Н.М., Фумм Г.Я., Жолудев И.С. Привод раздвижной двери кабины лифта (варианты) // БИ № 11, 2013.
3. Масандилов Л.Б., Кураев Н.М. Особенности выбора расчетных параметров асинхронного двигателя при частотном управлении // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып. 683. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 24-30.
4. Масандилов Л.Б., Кураев Н.М. Расчет параметров Т-образной схемы замещения и характеристик цилиндрических линейных асинхронных двигателей // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып. 687. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 14-26.
5. Масандилов Л.Б., Кузиков С.В., Кураев Н.М. Расчет параметров схем замещения и характеристик цилиндрических линейных асинхронных и МГД-двигателей // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып. 688. – М.: Издательство МЭИ, 2012. – С. 4-16.
6. Байдаков О.В., Кураев Н.М. Модернизация электропривода по системе ТПН-АД с квазичастотным управлением // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 3 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – С. 123.