

ГЧЧ  
СССР — МПС  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

---

На правах рукописи

Аспирант ГЕТЬМАН  
Геннадий Кузьмич

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОПТИМАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ  
В ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОМ ТЯГОВОМ  
ЛИНЕЙНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

(05.22.09 — электрификация железнодорожного транспорта)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК  
1974

НТБ  
ДНУЖТ

На правах рукописи

Аспирант ГЕТЬМАН  
Геннадий Кузьмич

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ОПТИМАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ  
В ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОМ ТЯГОВОМ  
ЛИНЕЙНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

(05.22.09 — электрификация железнодорожного транспорта)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА  
Дніпропетровського національного  
університету залізничного транспорту  
Імені академіка В.Лазаряна

НТБ  
ДНУЖТ

6483a

Работа выполнена в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

**Научные руководители:**

кандидат технических наук, доцент ВИСИН Н. Г.;  
кандидат технических наук, доцент КОРЕПАНОВ Г. Я.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор СВЕЧАРНИК Д. В.;  
кандидат технических наук, профессор РЕБРОВ С. А.

Ведущее предприятие — Киевский завод электро-транспорта им. Ф. Э. Дзержинского.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1974 г.

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 1974 г. на заседании Ученого совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (320010, г. Днепропетровск-10, ул. Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

**Ученый секретарь Совета**

кандидат технических наук, доцент Логвин А. Ф.

НТБ  
ДНУЖТ

## ВВЕДЕНИЕ

В целях дальнейшего технического оснащения железнодорожного транспорта рядом решений партии и правительства поставлена задача более широко развернуть работы по исследованию новых видов транспорта и систем тяги.

Анализ выполненных в различных странах разработок показывает, что одним из перспективных видов является транспорт с использованием в качестве тягового линейного асинхронного двигателя. Поэтому в решении Коллегии Министерства путей сообщения от 29 марта 1973 г. «О перспективах электрификации железных дорог и совершенствовании электрической тяги» указана необходимость проведения научных исследований и конструкторских работ по использованию линейных двигателей на электрическом транспорте.

Работы по созданию и исследованию линейных двигателей ведутся как в нашей стране, так и за рубежом (США, ГДР, Японии, Англии и других наиболее развитых странах).

Фундаментальные работы по теории рассматриваемых машин выполнены А. И. Вольдеком, Н. М. Охременко, Г. И. Штурманом.

Этому же вопросу посвящены работы В. А. Глухих, Я. Я. Лиелпетера, Х. А. Лийна, М. Г. Резина, А. П. Ращепкина, В. Е. Скобелева, Х. И. Янеса и других ученых.

Вопросами исследования и создания линейных двигателей занимается ряд учебных заведений и научных организаций нашей страны.

Возросший интерес к линейному двигателю объясняется стремлением использовать целый комплекс его положительных качеств: бесшумность работы, отсутствие загрязняющих атмосферу отходов, бесконтактная реализация силы тяги и др.

В настоящее время наметилось много перспективных областей применения линейного двигателя: монорельсовые дороги



и скоростной наземный транспорт, привод конвейерных поездов и карьерного электроподвижного состава, внутризаводской транспорт и ряд других.

Однако многим крупным возможностям линейного двигателя в различных областях техники противостоят его существенные недостатки, главным образом невысокие энергетические показатели. Поэтому судить о целесообразности использования линейного двигателя для целей тяги в тех или иных условиях можно лишь после определения общей технико-экономической оценки оборудования нового типа, которая может быть получена из сопоставительного анализа технико-экономических показателей при всех возможных системах тяги.

Основанием для такого анализа может служить только научная экспериментально проверенная методика расчета линейного двигателя, позволяющая проектировать рациональные конструкции, наилучшим образом удовлетворяющие предъявляемые к этому двигателю требования.

Таким образом, методика проектирования линейного двигателя должна базироваться на теоретическом и экспериментальном исследовании оптимальных соотношений в нем. Этому исследованию применительно к управляемому частотой двигателю и посвящена реферируемая работа.

Несмотря на то, что в технической литературе опубликовано большое количество относящихся к исследованию линейных двигателей работ, основной вопрос проектирования — выбор оптимальных главных параметров и размеров этого двигателя разработан пока недостаточно.

Целью настоящей работы является разработка методик установления оптимальных по максимуму к.п.д. и максимуму реализуемой силы тяги главных параметров и размеров линейных тяговых двигателей для карьерного электроподвижного состава и внутризаводского транспорта, предназначенных для работы при скоростях движения до 40—50 км/час. Основное внимание уделено конструкции с двусторонним плоским индуктором и немагнитной вторичной частью, которая является наиболее перспективной для целей тяги.

В соответствии с поставленной целью в диссертации рассмотрены следующие вопросы:

исследование зависимости потерь в двигателе от частоты скольжения и толщины реактивной шины; разработка методики оптимизации этих параметров;

разработка методики установления оптимальных по мак-

симуму к.п.д. полюсного деления и числа пар полюсов в активной зоне индуктора;

исследование влияния частоты скольжения и толщины реактивной шины на реализуемую двигателем силу тяги; разработка методики определения оптимальных пусковых частот;

исследование влияния продольных краевых эффектов на оптимальные соотношения в линейном двигателе;

экспериментальная проверка основных теоретических выводов.

**В первой главе** сформулирована задача об оптимальных соотношениях в линейном тяговом двигателе (ТЛД), дан краткий обзор выполненных по этому вопросу исследований, изложены основные допущения и исходные данные.

Вопросы установления оптимальных соотношений в асинхронных машинах с разомкнутым магнитопроводом применительно к плоским индукционным насосам, которые по принципу действия аналогичны линейным двигателям, рассматривались рядом авторов. Принципиальный путь решения этих задач был намечен А. И. Вольдеком, а решение их содержится в работах Н. М. Охременко, Х. А. Лийна, В. А. Глухих и других ученых. Однако известные решения этих задач из-за различия в исходных данных на проектирование двигателей и насосов не могут быть положены в основу определения главных параметров и размеров линейных двигателей.

Следует отметить, что при оптимизации индукционных насосов обычно исключают из рассмотрения продольные краевые эффекты или учитывают их, вводя в расчет коэффициенты, полагаемые постоянными в области изменения определяемых величин.

Такой подход к вопросу в случае жидкометаллической вторичной среды вполне оправдан, так как в реальных устройствах поля первичных продольных краевых эффектов могут быть практически полностью подавлены, а роль вторичных краевых эффектов здесь относительно слабая.

По отношению к линейным двигателям, вторичная система которых обладает сравнительно высокой электропроводностью, по-видимому, нельзя безоговорочно принять указанное допущение, не исследовав дополнительно вопрос о том, не приведет ли подобное упрощение задачи к соотношениям, слишком далеким от оптимальных.

В настоящее время существует довольно обширная научно-техническая литература, посвященная вопросам теории,

расчета и применения линейных двигателей. Однако работ, относящихся к исследованию оптимальных соотношений в этих машинах, еще мало. В литературе практически нет сведений о влиянии продольных краевых эффектов на оптимальные соотношения в двигателе. Ощущается недостаток экспериментальных исследований. Выполненные работы лишь в известной степени осветили вопрос, поэтому задача об оптимальной конструкции линейного двигателя требует самостоятельного рассмотрения.

Вопрос об оптимальной конструкции можно поставить, исходя из различных критериев оптимальности. Однако наиболее существенный недостаток линейных двигателей, который является основным препятствием на пути их практического применения,— сравнительно невысокий к.п.д., поэтому в диссертации основное внимание уделено нахождению оптимума по минимуму потерь.

Важное практическое значение имеет также задача оптимизации двигателя по минимуму токовой нагрузки индуктора. Ее решение открывает возможность проектировать двигатели минимальных размеров, а в случае ТЛД с известной геометрией индуктора определить оптимальные пусковые частоты, позволяющие реализовать максимальную силу тяги при ограничении выходного тока источника питания. Учитывая актуальность этой задачи для расчета пусковых режимов ТЛД, в диссертации ей посвящена отдельная глава.

Задача оптимизации двигателя по максимуму к.п.д. при заданных номинальной скорости движения и мощности (или соответствующей ей силе тяги) в общем случае состоит в определении целого ряда размеров и характеристических величин, доставляющих экстремум к.п.д. Однако на практике часть величин изменяется в незначительных пределах и они могут быть выбраны предварительно.

В реферируемой работе заданными приняты: номинальная линейная нагрузка и плотность тока в обмотках, тип обмоток возбуждения и обмоточный коэффициент, удельная электропроводность материала реактивной шины и обмоток возбуждения, высота шихтованного пакета сердечников индуктора и реактивной шины, величина воздушного зазора между боковыми поверхностями сердечников индуктора и вторичной части.

Анализ полученных на основании последовательной схемы замещения аналитических зависимостей, определяющих к.п.д. двигателя, показал, что при принятых исходных данных за-

дача сводится к определению частоты скольжения, полюсного деления, толщины реактивной шины и числа полюсов в активной зоне индуктора. Через перечисленные величины и заданную скорость движения однозначно определяется частота питающей сети. Из-за сложности функциональных зависимостей для решения задачи с учетом продольных краевых эффектов требуется привлечение средств вычислительной техники.

В ряде случаев, как показали исследования, в рассматриваемой области скоростей можно пренебречь влиянием продольных краевых эффектов. При этом удается получить удобные расчетные выражения, связывающие прямой зависимостью искомые величины и исходные данные. Исходя из этого, в диссертации исследование оптимальных соотношений выполнено как без учета продольных краевых эффектов, так и с их учетом и определены условия, в которых влиянием этих явлений можно пренебречь.

Выполненный на основании опубликованных в технической литературе исследований анализ особенностей электромагнитных процессов в линейном двигателе показал, что при установлении его главных параметров и размеров с приемлемой для практических целей точностью можно принять следующие допущения:

индуктированные во вторичной системе токи по толщине шины распределены равномерно;

сердечники индуктора ненасыщены;

учитываются только основные виды потерь — потери в обмотках и реактивной шине, так как потери в стали составляют небольшую долю общих потерь;

результатирующий коэффициент зазора, учитывающий зубчатость сердечников, ослабление поля на их краях и неоднородность поля по толщине зазора, принимается постоянным при изменении зазора и полюсного деления.

Кроме того, выполненный применительно к принятой к рассмотрению конструкции ТЛД анализ влияния поперечных краевых эффектов на параметры вторичной системы показал, что при определении основных размеров и параметров управляемого частотой двигателя можно пренебречь вторичным рассеянием и поперечным поверхностным эффектом.

Во второй главе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования оптимальных соотношений в двигателе с известной геометрией индуктора.

В результате проведенного анализа установлено, что при отсутствии продольных краевых эффектов соответствующие

реализации заданной силы тяги потери мощности в ТЛД принимают минимальное значение при частоте скольжения

$$f_{2p} = k_2 \delta \sqrt{\frac{k_1}{\Delta(1 + \Delta k_1)}} \quad (1)$$

где  $\Delta$  — толщина немагнитной реактивной шины;

$\delta$  — зазор между сердечниками индуктора с учетом толщины вторичной части. Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  равны:

$$k_1 = \frac{j_n \gamma_2 (\xi \tau + h)}{A_n \gamma_1 h k_r k_{об}}; \quad k_2 = \frac{\pi h k_8}{2 \mu_0 \gamma_2 \tau^2},$$

где  $A_n$ ,  $j_n$  — номинальные значения суммарной линейной нагрузки обоих сердечников индуктора и плотности тока в обмотках;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  — удельная электропроводность меди обмоток и материала реактивной шины;  $\tau$ ,  $h$  — полюсное деление и высота шихтованного пакета сердечников индуктора;  $k_{об}$  и  $k_8$  — обмоточный коэффициент и результирующий коэффициент зазора;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $\xi$  — отношение длины лобовой части полувитка к полюсному делению;  $k_r$  — коэффициент, характеризующий увеличение приведенного активного сопротивления вторичной системы за счет поперечных краевых эффектов.

Исследованием зависимости отдельных составляющих потерь от частоты скольжения установлено следующее:

потери в обмотке возбуждения минимальны при частоте

$$f_{1n} = k_2 \frac{\delta}{\Delta}; \quad (2)$$

экстремумы зависимостей потерь в обмотке  $P_1$  и суммарных электрических потерь  $P_a$  не совпадают ( $f_{2n} > f_{2p}$ );

минимуму потерь в первичной цепи и минимуму суммарных потерь соответствует равенство их составляющих, обусловленных током намагничивания и током вторичной цепи.

Выполнено качественное и количественное сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей потерь и их составляющих от частоты для ряда значений толщины шины и величины суммарного воздушного зазора  $\delta_2 = \delta - \Delta$ . Характер этих зависимостей иллюстрирует рис. 1, на котором кружками и крестиками показаны полученные из опыта значения потерь (они отнесены к единице развиваемой силы тяги), а сплошные линии соответствуют расчету.  $P_{10}$  и  $P_{12}$  — составляющие потерь в обмотке, обусловленные током намагничивания и током реактивной шины,  $P_2$  — потери в шине.

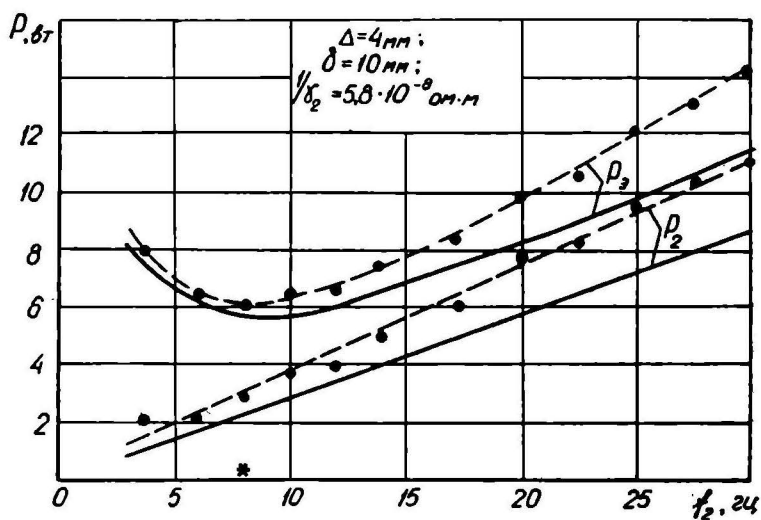


Рис. 1а. \* — расчет по формуле (1).

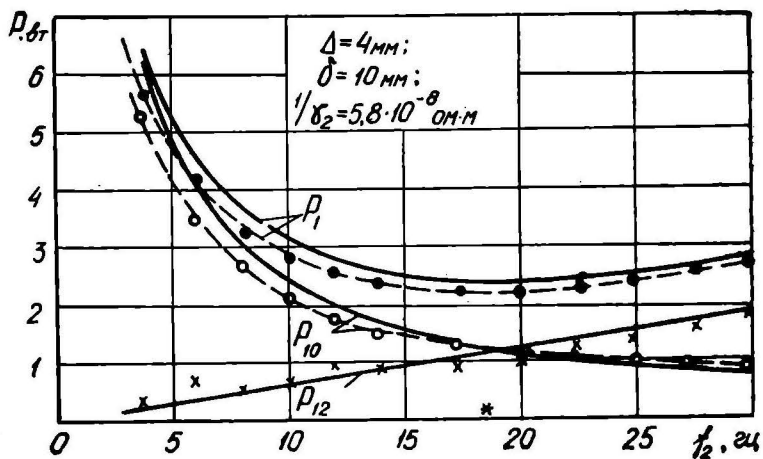


Рис. 1б \* — расчет по формуле (2).

Экспериментальные исследования выполнены при неподвижной вторичной системе на модели двигателя, в зазоре которого имели место сильные поля первичных продольных краевых эффектов. По этой причине найденные из опыта потери в шине и суммарные электрические потери превышают рассчитанные без учета продольных краевых эффектов. Однако качественно аналитические зависимости хорошо согласуются с данными опыта, что подтверждает правильность полученных расчетных выражений и сделанных выводов.

Выполнен анализ зависимости потерь в ТЛД от толщины реактивной шины. Установлено, что при фиксированном воздушном зазоре между вторичной частью и боковыми поверхностями сердечников и неизменной частоте скольжения при отсутствии продольных краевых эффектов справедливы следующие положения:

составляющая потеря, обусловленная током намагничивания, имеет минимум при  $\Delta = \delta_2$ , т. е. когда толщина шины равна величине суммарного воздушного зазора;

потери во вторичной цепи не зависят от толщины реактивной шины;

потери в обмотке и суммарные электрические потери минимальны при

$$\Delta = \frac{k_2 \delta_2}{\sqrt{f'^2 + k_2^2}}. \quad (3)$$

Полученные результаты подтверждаются опытными данными (рис. 2).

Для определения оптимальных значений частоты скольжения и толщины шины, доставляющих максимум к.п.д. при фиксированном полюсном делении, исследован экстремум зависимости потерь мощности как функции двух переменных. Получены формулы

$$\Delta'_0 = \frac{\sqrt{1 + 8k_1 \delta_2} - 1}{4k_1}; \quad f'_{20} = \frac{k_2}{\Delta'_0} \sqrt{\delta_2^2 - \Delta'^2_0}, \quad (4)$$

которые позволяют при слабом влиянии продольных краевых эффектов рассчитать наивыгоднейшие значения частоты и толщины шины по исходным данным. Правильность выражений (4) подтверждена путем экспериментального определения зависимости потерь от частоты для ряда значений толщины шины при неизменном зазоре  $\delta_2$ .

Применительно к двигателю без компенсирующих элементов обмотки с постоянной линейной нагрузкой в активной зоне

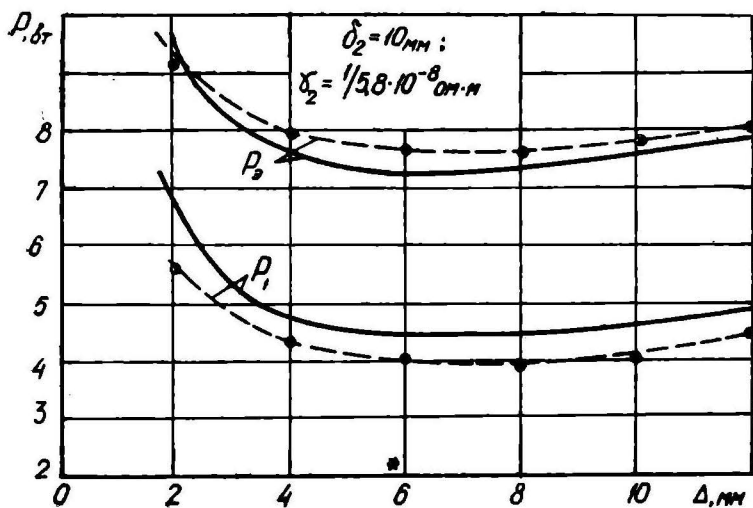


Рис. 2а. \* — расчет по формуле (3).

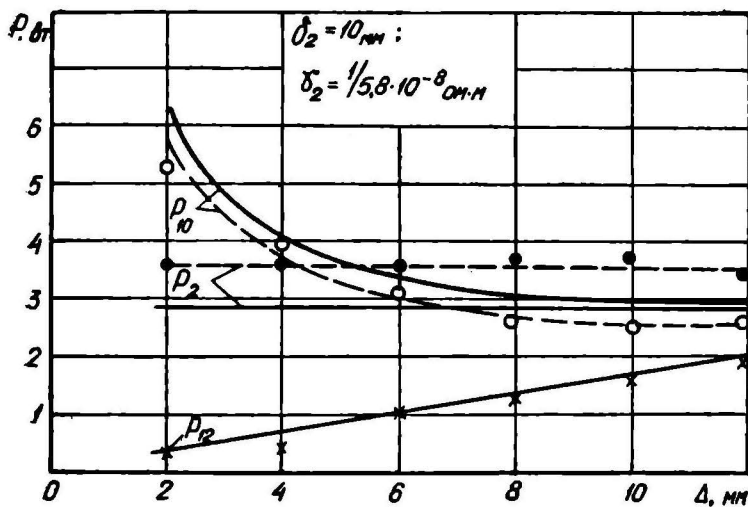


Рис. 26.



выполнено исследование влияния продольных краевых эффектов на оптимальные значения частоты скольжения и толщины шины.

Анализ рассчитанных с помощью ЭЦВМ данных показал, что при скоростях движения приблизительно до 2,5 м/сек продольные краевые эффекты обуславливают незначительное (до 10%) снижение оптимальных частот вторичной цепи.

С ростом скорости усиливающееся влияние продольных краевых эффектов во вторичной цепи приводит к увеличению оптимальных частот и потерь мощности, которое может быть оценено по приведенным в диссертации графическим зависимостям.

В диапазоне скоростей движения до 5 м/сек соответствующие минимуму потерь частоты вторичной цепи с точностью до 10% определяются выражением (1).

Продольные краевые эффекты обуславливают снижение оптимальных по минимуму потерь значений толщины шины. Это снижение незначительно и в рассматриваемой области скоростей при числе пар полюсов  $p \geq 3$  не превышает 10%.

Вторичная система линейного двигателя должна обладать определенной механической прочностью, поэтому при проектировании конкретной конструкции возможны отступления от толщины шины, соответствующей максимальному к.п.д.

Анализ приведенных в работе экспериментальных (рис. 2) и расчетных данных показал, что в области экстремума потери мощности в ТЛД весьма слабо зависят от толщины шины и, следовательно, предъявляемые к ней требования механики могут быть удовлетворены практически без ущерба для энергетических показателей. Из этого также следует, что при проектировании двигателя с большой протяженностью реактивной шины ее толщина с целью экономии материала должна выбираться минимально возможной по условиям механической прочности.

В третьей главе рассмотрены вопросы выбора оптимальной величины полюсного деления и числа пар полюсов в активной зоне индуктора.

Выполненные исследования показали, что при определении оптимальной по минимуму потерь величины полюсного деления пренебречь влиянием продольных краевых эффектов можно только при проектировании двигателей, предназначенных для работы в качестве силовозбудительных механизмов с близкой к нулю скоростью перемещения вторичной системы.

Для указанного случая предложен графо-аналитический

способ определения оптимального полюсного деления, основанный на исследовании выражения потерь

$$P_s = 2F\tau \left[ k_1 \left( f_2 \Delta + k_2^2 \frac{(\delta_2 + \Delta)^2}{\Delta f_2} \right) + f_2 \right], \quad (5)$$

полученного без учета влияния продольных краевых эффектов ( $F$  — номинальная сила тяги).

Потери  $P_s$  не зависят от числа полюсов, поэтому определить соответствующее их минимуму полюсное деление можно путем расчета с помощью формул (4) и (5) кривой  $P'_s(\tau)$ , где  $P'_s$  — потери при частоте  $f'_{20}$  и толщине шины  $\Delta'_0$ . Оптимальное значение полюсного деления определяется минимумом кривой  $P'_s(\tau)$ , а соответствующие ему частота и толщина шины — по построенным зависимостям  $f'_{20}(\tau)$  и  $\Delta'_0(\tau)$  или по формулам (4). Если толщина шины выбрана предварительно, при расчете  $P'_s(\tau)$  частота скольжения определяется по формуле (1).

Полюсное деление, частота скольжения и толщина шины однозначно определяют частоту источника питания и активную длину сердечников. Для расчета последней получены формулы:

$$2p\tau = \frac{2F\tau f_2 \gamma_2 \Delta}{(A_m k_{00})^2 k_r h} \left( \frac{k_r^2}{e^2} + 1 \right); \quad (6)$$

$$2p\tau = \frac{2\pi k_s \delta_2 F}{(A_m k_{00})_2 \mu_0 \tau h} \sqrt{\frac{\delta_2 + \Delta'_0}{\delta_2 - \Delta'_0}}, \quad (7)$$

где параметр магнитного взаимодействия

$$e = \frac{2\mu_0 \gamma_2 \tau^2 \Delta f_2}{\pi k_s \delta}$$

Выражение (7) применимо только в случае, когда частота и толщина шины соответствуют минимуму потерь.

Величина  $2p\tau$  должна быть выбрана такой, чтобы  $p$  было целым числом. Поскольку формулы (6) и (7) дают, как правило,  $p \neq$  целому числу, то следует принять следующее целое число или несколько изменить ранее выбранное полюсное деление.

При скоростях движения  $7 \div 15$  м/сек и больших, как показали выполненные исследования, продольные краевые эффекты обуславливают заметное уменьшение наивыгоднейших с точки зрения потерь значений полюсного деления, притом в тем большей степени, чем выше скорость и меньше номинальная сила тяги. Последнее является следствием того,

что меньшей силе тяги при прочих равных условиях соответствует меньшее число полюсов индуктора.

С учетом продольных краевых эффектов потери определяются полученной на основании последовательной схемы замещения линейного двигателя зависимостью

$$P_{\text{эк}} = \frac{2F\tau}{r_{\text{омо}} + r_{\text{кф}}} \left[ k_1 k_2 \delta + f_2 (\dot{r}_{\text{омо}} + \dot{r}_{\text{кф}}) + f_1 (\dot{r}_{\text{кв}} - \dot{r}_{\text{кф}}) \right] \quad (8)$$

где  $f_1$  — частота питающего напряжения;

$$r_{\text{омо}} = \frac{\varepsilon'}{1 + \varepsilon'^2}; \quad \varepsilon' = \frac{\varepsilon}{k_r},$$

а звездочками обозначены величины, отнесенные к единице главного индуктивного сопротивления обмотки индуктора. Учитывающие влияние продольных краевых эффектов параметры  $r_{\text{кф}}$  и  $r_{\text{кв}}$  определялись по формулам, полученным А. И. Вольдеком и Е. В. Толвинской для двигателя без компенсирующих элементов обмотки с постоянной линейной нагрузкой в активной зоне.

При принятых исходных данных и предварительно выбранной толщине шины в выражение (8) входят три подлежащие определению величины:  $\tau$ ,  $f_2$  и  $p$  ( $f_1$  определяется через  $f_2$  и  $\tau$ ), поэтому для определения оптимальных значений  $\tau$  и  $p$  следует установить экстремум  $P_{\text{эк}}(f_2, \tau, p)$  при одновременном выполнении условия реализации заданной силы тяги при номинальной токовой нагрузке индуктора.

Наложенное условие позволяет исключить из (8) одну из подлежащих определению величин с помощью выражения для силы тяги

$$F = \frac{2(A_n \tau k_{00})^2 \mu_0 p h}{\pi k_1 \delta} (\dot{r}_{\text{омо}} + \dot{r}_{\text{кф}}) \quad (9)$$

Анализ зависимости  $F(f_2, \tau, p)$  показал, что при определении условного экстремума (8) из выражения потерь целесообразно исключать число пар полюсов или полюсное деление.

В диссертации приведен машинный алгоритм определения минимума (8) как функции частоты скольжения при фиксированном полюсном делении (число пар полюсов определяется из уравнения (9) для каждой комбинации  $\tau$  и  $f_2$ ). Алгоритм позволяет рассчитать зависимость минимальных потерь от полюсного деления и на основании ее анализа установить рациональный вариант.

Характер указанной зависимости иллюстрируют графики

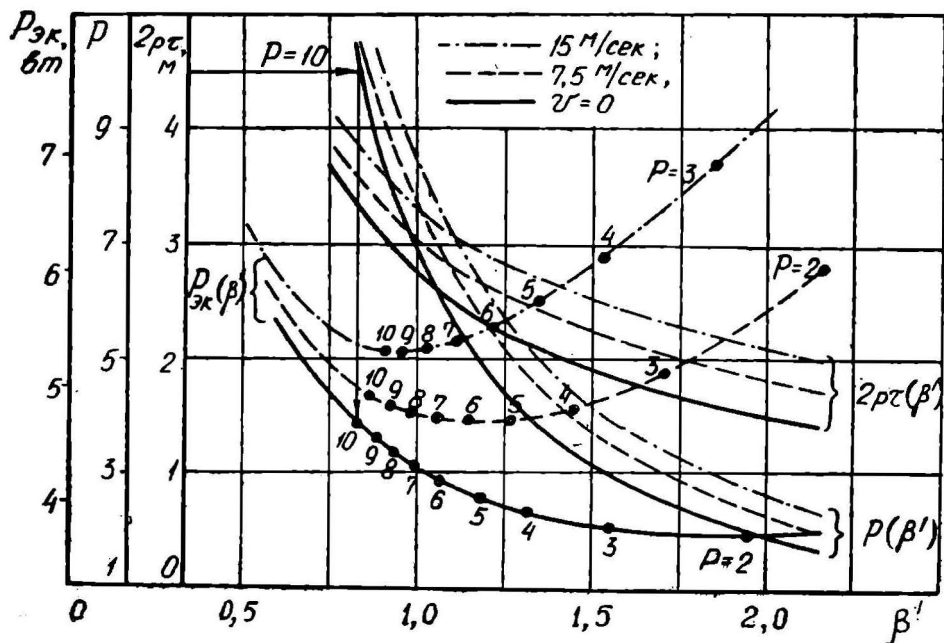


Рис. 3.

соответствующих единице силы тяги потерь  $P_{эк}(\beta')$  рис. 3 (ось абсцисс проградуирована в единицах коэффициента геометрии полюса  $\beta' = \tau/h$ ). Кривые  $p(\beta')$  и  $2p\tau(\beta')$  используются для определения значений  $\tau$ , удовлетворяющих условию  $p = \text{целому числу}$ , и оценки габаритов двигателя.

Расчеты, выполненные на ЭЦВМ «Наири-С» для двигателей с различными номинальными данными, показали, что в области оптимума потери слабо зависят от полюсного деления и имеется возможность широкой вариации этого параметра при практически неизменном к.п.д., поэтому для окончательного решения вопроса о выборе полюсного деления и числа пар полюсов в каждом конкретном случае анализ потерь должен быть дополнен анализом весовых показателей и габаритных ограничений.

В четвертой главе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования соотношений в линейном двигателе, оптимальных по минимуму токовой нагрузки индуктора (максимуму реализуемой силы тяги).

В условиях эксплуатации в ряде случаев, в частности при пуске, требуется реализация силы тяги большей, чем номинальная. Если основные геометрические соотношения в двигателе установлены для номинального режима работы, например по максимуму к.п.д., то получить большую номинальную силу тяги можно путем изменения токовой нагрузки и частоты скольжения. Последнюю целесообразно выбрать так, чтобы обеспечить необходимое увеличение силы тяги при минимальном повышении токовой нагрузки.

В результате выполненного исследования зависимости тока первичной цепи от частоты скольжения установлено, что при отсутствии продольных краевых эффектов минимуму токовой нагрузки соответствует равенство  $\epsilon = k_r$ , которое удовлетворяется при частоте  $f_{2n}$ , определяемой выражением (2). Частоте  $f_{2n}$  соответствует равенство тока намагничивания и приведенного к первичной цепи тока реактивной шины. Справедливость этого положения доказана также по отношению к двигателю со стальной ферромагнитной шиной при резком проявлении поверхностного эффекта.

Показано, что в оптимизированном по минимуму тока линейном двигателе угол сдвига фаз первичного тока и индуцированной в обмотке основной гармоникой потока в зазоре э.д.с. равен

$$\psi_{1n} = \frac{\pi}{4} + \varphi_2,$$

где  $\varphi_2$  — угол сдвига фаз э.д.с. и тока вторичной цепи. При немагнитной вторичной среде  $\varphi_2 \cong 0$ , поэтому  $\psi_{1n} \cong 45^\circ$ , а в случае стальной ферромагнитной шины ( $\varphi_2 \cong 30^\circ$ ) угол  $\psi_{1n} \cong 60^\circ$ . Следовательно, при управлении по минимуму тока двигатель с немагнитной шиной имеет более высокий коэффициент мощности.

Параметры вторичной системы линейного двигателя могут быть приняты изменяющимися вдоль направления движения, поэтому в диссертации исследована возможность увеличения силы тяги за счет изменения толщины шины.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что в режиме  $A = \cos nt$  зависимость  $F(\Delta)$  имеет слабо выраженный максимум при толщине шины, определяемой формулой (3).

Если частота скольжения определяется по минимуму тока, то с ростом толщины шины максимальная сила тяги, которая может быть реализована при заданной линейной нагрузке и

$\delta_2 = \text{const}$ , монотонно убывает. Полученное для этого случая выражение

$$F_m = \frac{\mu_0 p h (A k_{огт})^2}{\pi k_s (\delta_2 + \Delta)} \quad (10)$$

указывает на то, что для увеличения  $F_m$  следует стремиться к снижению воздушного зазора и толщины шины. Формула (10) позволяет рассчитать минимальную токовую нагрузку, при которой возможна реализация заданной силы тяги.

Для подтверждения правильности сделанных выводов выполнено экспериментальное исследование зависимости тока индуктора и его составляющих от частоты вторичной цепи и толщины шины в режиме  $F = \text{const}$  при неподвижной вторичной части. Получено удовлетворительное количественное и качественное согласование опытных данных с расчетными.

Экспериментальным путем для ряда значений воздушного зазора и толщины шины определены частоты, соответствующие минимуму тока индуктора (пусковые). Расхождения опытных данных с рассчитанными по выражению (2) не превышают 10%.

На основании выполненных исследований установлено, что за счет обусловленных разомкнутостью магнитной цепи линейного двигателя явлений с ростом скорости максимум силы тяги смещается в область более высоких частот скольжения. Для определения оптимальных по минимуму тока частот скольжения предложена формула

$$f_{2пк} = f_{2н} k_f, \quad (11)$$

где  $f_{2н}$  — частота, определяемая выражением (2), а коэффициент  $k_f$  учитывает влияние продольных краевых эффектов.

Коэффициент  $k_f$  численно равен значению параметра  $\epsilon'$ , реализующему максимум отношения

$$\frac{F}{F_m} = 2(\dot{r}_{эм0} + \dot{r}_{кф}), \quad (12)$$

где  $F$  — сила тяги, определяемая выражением (9).

В общем случае величина отношения (12) определяется добротностью машины  $\epsilon'_0$ , числом пар полюсов и параметром  $\epsilon'$ . Однако при заданной скорости движения  $v$  добротность однозначно определяется через  $\epsilon'$  выражением

$$\epsilon'_0 - \epsilon' = \frac{\mu_0 \gamma_s \Delta}{\pi k_s} v, \quad (13)$$

поэтому для конкретного двигателя  $F/F_m$  зависит только от величины  $\varepsilon'$  и коэффициент  $k_f$  можно найти, определив экстремум отношения (12) как функции параметра  $\varepsilon'$  при фиксированном значении  $\varepsilon'_0 - \varepsilon'$ .

На рис. 4 приведены рассчитанные с помощью ЭЦВМ зависимости  $k_f(\varepsilon'_0 - \varepsilon')$  для двигателя без компенсирующих элементов обмотки и с постоянной линейной нагрузкой в активной зоне (шкала скорости построена при  $\Delta = 10$  мм;  $\delta = 30$  мм;  $\tau = 0,3$  м;  $1/\gamma_2 = 4,7 \cdot 10^{-8}$  ом·м;  $\beta' = 1,5$ ), которые позволяют с помощью формул (2) и (11) определить оптимальные пусковые частоты с учетом продольных краевых эффектов.

Частоте вторичной цепи  $f_{2нк}$  соответствует относительное скольжение

$$S = \frac{k_f}{\varepsilon'_0 - \varepsilon' + k_f}, \quad (14)$$

поэтому зависимости  $k_f(\varepsilon'_0 - \varepsilon')$  дают возможность оценить величину электромагнитного к.п.д. двигателя без вычисления потерь.

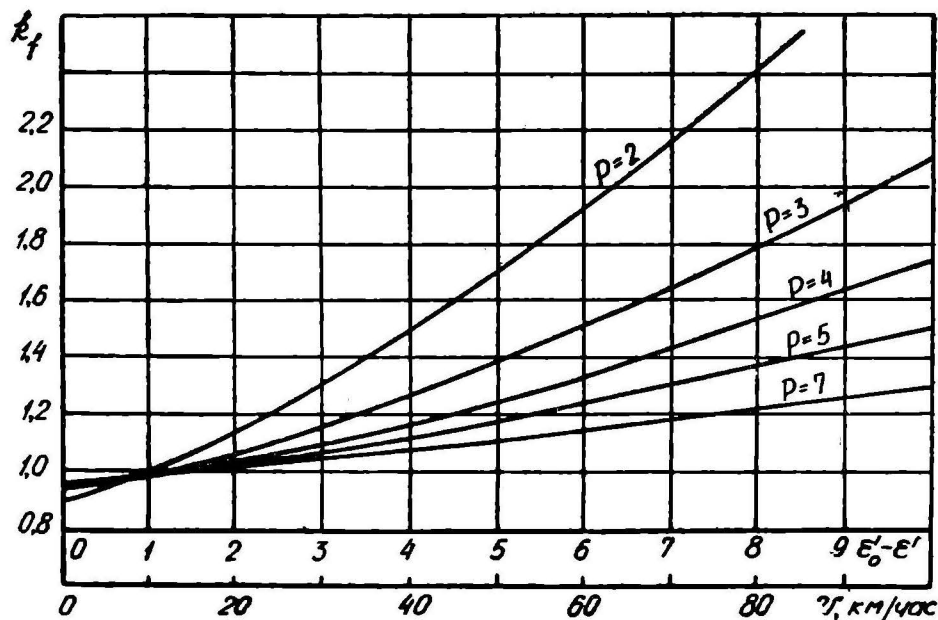


Рис. 4.

Продольные краевые эффекты обуславливают наличие дополнительных электромагнитных сил, которые при  $A = \text{const}$  и  $f_2 = f_{2\text{нк}}$  с ростом скорости снижают результирующую силу тяги. В рассматриваемой области скоростей это снижение составляет 10—30% в зависимости от числа полюсов и может быть определено по приведенным в работе графическим зависимостям.

В пятой главе, которая носит вспомогательный характер, изложена программа экспериментальных исследований модели линейного двигателя и методика проведения опытов, предпринятых для проверки основных положений работы.

Опыты проводились на лабораторной модели линейного двигателя с двусторонним плоским индуктором и однослойной обмоткой без компенсирующих элементов. Высота шихтованного пакета сердечников равнялась 120 мм, число полюсов — 4, полюсное деление — 144 мм.

Вторичная часть выполнена из алюминиевого сплава АМГ-2м. Высота шины с целью ослабления поперечных краевых эффектов принята большей высоты сердечников (200 мм).

Питание обмоток индуктора осуществлялось от машинного агрегата. Амплитуда и частота питающего напряжения регулировались изменением скорости вращения и тока возбуждения синхронного генератора.

Программа экспериментальных исследований включала: определение зависимости потерь в стали от токовой нагрузки индуктора и частоты питающего напряжения при различной величине воздушного зазора;

определение зависимости электрических потерь и их составляющих от частоты и толщины шины в режиме  $F = \text{const}$ ;

определение оптимальных пусковых частот и зависимости токовой нагрузки от частоты и толщины шины в режиме  $F = \text{const}$ .

В результате проведенных при удаленной вторичной части опытов установлена зависимость потерь в стали от тока намагничивания, частоты питающего напряжения и величины зазора, которая использовалась для определения этого вида потерь в режиме нагрузки.

Мощность суммарных потерь в двигателе определялась путем осциллографирования токов и напряжений всех фаз обмотки.

Разделение потерь в обмотке на обусловленные током намагничивания и током в реактивной шине, как и определение потерь в стали в режиме нагрузки, базировалось на предпо-



ложении, что распределение индукции в зазоре по длине и ширине сердечников имеет такой же характер, как и при пустом зазоре. Корректность такого допущения в условиях проведенных опытов подтверждена путем осциллографирования огибающих нормальной составляющей индукции в зазоре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований оптимальных соотношений в тяговых линейных двигателях можно сделать следующие выводы:

1. Как показали исследования, в регулируемом частотой линейном асинхронном двигателе с плоским двусторонним индуктором при фиксированном воздушном зазоре между сердечниками индуктора и вторичной системой потери мощности слабо зависят от толщины реактивной шины, поэтому предъявляемые к ней требования механики при проектировании могут быть удовлетворены практически без ущерба для энергетических показателей.

2. Установлено, что при слабом влиянии обусловленных разомкнутостью магнитной системы явлений суммарные электрические потери в линейном двигателе и потери в обмотках возбуждения принимают минимальное значение при частотах вторичной цепи, соответствующих равенству составляющих потерь от тока намагничивания и тока реактивной шины.

3. На основании анализа, выполненного применительно к линейному двигателю без компенсирующих элементов обмотки с постоянной линейной нагрузкой в активной зоне, показано, что оптимальная по максимуму к.п.д. частота скольжения и толщина шины с приемлемой для практических целей точностью при скоростях движения до 5 м/сек могут быть определены без учета продольных краевых эффектов. Для этого случая предложены простые аналитические выражения, связывающие прямой зависимостью оптимизируемые величины и исходные данные.

С ростом скорости усиливающееся влияние продольных краевых эффектов во вторичной цепи приводит к увеличению оптимальных частот и потерь мощности, которое может быть определено по приведенным графическим зависимостям.

4. При проектировании линейных двигателей, предназначенных для работы в качестве силовозбудительных механизмов с близкими к нулю скоростями перемещения вторичной

системы, оптимальная величина полюсного деления и число полюсов индуктора с приемлемой для инженерных расчетов точностью могут быть определены без учета продольных краевых эффектов по предложенной в диссертации методике.

5. Установлено, что с ростом скорости движения продольные краевые эффекты обуславливают существенное уменьшение наивыгоднейших значений полюсного деления. Предложенный алгоритм расчета позволяет решить задачу об оптимальной величине полюсного деления с помощью ЭЦВМ и на стадии проектирования без расчета обмоточных данных оценить энергетические показатели двигателя.

6. Выполненные исследования показали, что в области оптимума к.п.д. линейного двигателя относительно слабо зависит от полюсного деления, поэтому имеется возможность довольно широкой вариации числа пар полюсов и полюсного деления, облегчающая конструирование. Для окончательного решения задачи о выборе полюсного деления в каждом конкретном случае анализ потерь мощности следует дополнить рассмотрением габаритных ограничений и весовых показателей.

7. В режиме реализации наибольшей силы тяги линейный двигатель с немагнитной реактивной шиной при равных воздушных зазорах между шиной и сердечниками индуктора имеет более высокий коэффициент мощности, чем двигатель со стальной ферромагнитной шиной.

8. Показано, что за счет влияния продольных краевых эффектов увеличение скорости движения сопровождается ростом оптимальных пусковых частот и снижением силы тяги, развиваемой двигателем при постоянной токовой нагрузке первичной цепи. В диапазоне скоростей движения до 15 м/сек для некомпенсированной машины с постоянной линейной нагрузкой на протяжении активной зоны снижение силы тяги составляет 10—30% и может быть определено по приведенным в работе зависимостям.

9. Разработанная методика определения пусковых частот позволяет определить оптимальные пусковые режимы ТЛД с учетом влияния продольных краевых эффектов.

Результаты проведенных автором исследований используются ОКБ линейных электродвигателей Киевского завода электротранспорта им. Ф. Э. Дзержинского при разработке управляемых частотой электроприводов с линейными асинхронными двигателями.

НТБ  
ДНУЖТ

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Корепанов Г. Я., Гетьман Г. К. Расчет характеристик частотноуправляемых линейных асинхронных двигателей. Труды ДИИТа, вып. 135, Днепропетровск, 1972.
2. Гетьман Г. К., Корепанов Г. Я., Цымбал Н. Н. Исследование работы асинхронных двигателей и статических преобразователей частоты в режиме пуска. Материалы юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970.
3. Гетьман Г. К. Оптимизация управляемых частотой линейных асинхронных двигателей по минимуму потерь. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции по электроприводам с линейными электродвигателями, Киев, 1973.
4. Корепанов Г. Я., Гетьман Г. К. Оптимизация частотноуправляемого линейного двигателя по минимуму тока. Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции по электроприводам с линейными электродвигателями, Киев, 1973.
5. Гетьман Г. К. Расчет оптимальных соотношений в частотноуправляемом линейном двигателе. Депонированная рукопись ЦНИИТЭИ МПС, № 63/73, 1973.
6. Корепанов Г. Я., Гетьман Г. К. Метод расчета пусковой частоты линейного асинхронного двигателя со сплошной реактивной шиной. Депонированная рукопись ЦНИИТЭИ МПС, № 75/73, 1973.
7. Гетьман Г. К. Оптимальные соотношения в регулируемом частотой линейном асинхронном двигателе. Труды ДИИТа, вып. 163, Днепропетровск (в печати).

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ДОКЛАДЫВАЛИСЬ И ОБСУЖДАЛИСЬ:**

- на юбилейной научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1970 г.;
- на научно-технической конференции ДИИТа, посвященной 50-летию СССР, Днепропетровск, 1972 г.;
- на Всесоюзной научной конференции по электроприводам с линейными электродвигателями, Киев, 1973 г.;
- на научно-технической конференции ДИИТа, Днепропетровск, 1974 г.;
- на заседании научного семинара кафедр электроподвижного состава, электрических машин и преобразователей ДИИТа, 1974 г.

НТБ  
ДНУЖТ

---

БТ 26813. Областная книжная типография Днепропетровского областного управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 320070, Днепропетровск, ул. Серова, 7. Зак. № 3488. Тираж 250 экз. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Объем 1,5 печ. л.  
Подписано к печати 1/VII 1974 г.

Сканировала Камьянская Н.А.

НТБ  
ДНУЖТ