

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Электромагнитный расчет линейного асинхронного двигателя выполнялся с использованием детализированных магнитных схем замещения (ДМСЗ) [1,5,7] в пакете MathCAD, а также с помощью двухмерной версии конечно-элементного полевого пакета Comsol Multiphysics. Влияние третьей координаты (ограниченной ширины вторичного элемента) в рассматриваемых методиках учитывается с помощью коэффициента Болтона [1], на который умножается электропроводность алюминиевого слоя вторичного элемента (ВЭ). Параметры индуктора в методе ДМСЗ рассчитываются с помощью известных выражений, применяемых для электрических машин классического исполнения [4]. Количество слоев в ДМСЗ варьируется, что отражается в ее названии – двухслойная, шестислойная, четырнадцатислойная. Количество участков по продольной координате принимается равным количеству пазов в индукторе, умноженному на 3 (по 24 участка в активной и двух краевых зонах). При числе пазов на полюс и фазу $q = 1$ общее количество участков в слое равно 72, при $q = 2$ соответственно 144. В последнем случае общее количество контуров и количество уравнений магнитного равновесия равно произведению 144 на количество выделенных слоев. Поскольку слои, в которых находится вторичный элемент, движутся, возникает погрешность при вычислении ЭДС движения (через магнитные потоки по зубцовым делениям) в уравнениях электрического равновесия соответствующих контуров. Погрешность может быть уменьшена либо уточнением формулы вычисления производных по координате [7], либо делением слоев по продольной координате на большее количество участков, либо тем и другим вместе.

III. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемый подход с использованием коэффициента Болтона характерен для так называемых квазитрехмерных моделей ЛАД, например [1,2,3,5]. Он обеспечивает достаточную для инженерных расчетов точность результатов при использовании скромных вычислительных ресурсов. Кроме этого применение метода детализированных схем замещения двигателя позволяет легко интегрировать их в полные структурные модели электромеханических систем, включающих в себя также блоки питания, механическую часть, систему автоматического управления.

Как отмечалось выше, точность расчетов характеристик двигателя с помощью двухмерных моделей во многом зависит от корректности учета влияния размеров индуктора и ВЭ по ширине (третьей координате).

На рис. 2 показаны зависимости электропроводности (с учетом коэффициента Болтона k_q) от главных размеров двигателя и материала ВЭ.

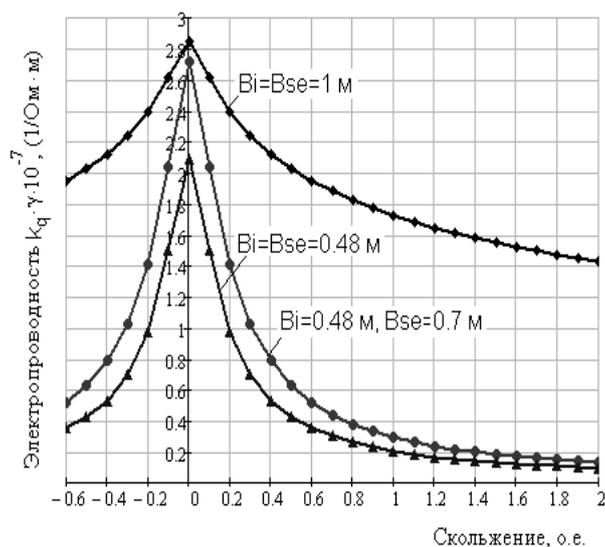


Рис. 2. Зависимости эквивалентной электропроводности ВЭ с учетом коэффициента Болтона от скольжения, ширины индуктора Bi и ВЭ Bse

Как видно, этот коэффициент существенно зависит от поперечных размеров ВЭ и индуктора, а также от скольжения. Естественно, что это ведет к зависимости от него тяговых усилий F_T а также нормальных усилий притяжения ферромагнитных сердечников $F_{пр}$ и противоположно направленных сил левитации $F_{лев}$ (рис. 3а). Линиями показаны характеристики, рассчитанные в пакете MathCad. Там же для сравнения показаны результаты расчета усилий левитации в пакете Comsol Multiphysics.

Можно отметить, что механическая характеристика ЛАД при заданном фиксированном токе в фазе 110 А (плотность тока 1.6 А/мм²) близка к классическому типу с критическим скольжением в области малых скольжений. Силы притяжения ферромагнитных сердечников статора и ВЭ максимальны в области малых скольжений от -0.2 до +0.2, а силы левитации, действующие на ВЭ, слабо зависят от скольжения.

Из полученного результата следует важный практический вывод о том, что выбором соотношения значений ширины индуктора и ширины ВЭ можно существенно влиять на характер изменения тягового усилия в зависимости от скольжения.

На рис. 3б показаны аналогичные зависимости при уменьшении ширины вторичного элемента до значения 0.48 м, равного ширине индуктора. При этом уменьшается электрическая проводимость поперечным током в массивном ВЭ, что ведет к увеличению тягового усилия в области повышенных скольжений.

Этот вывод можно использовать при выборе ширины неподвижной вторичной полосы на участках разгона и маршевых отрезках путевой структуры транспортной системы.

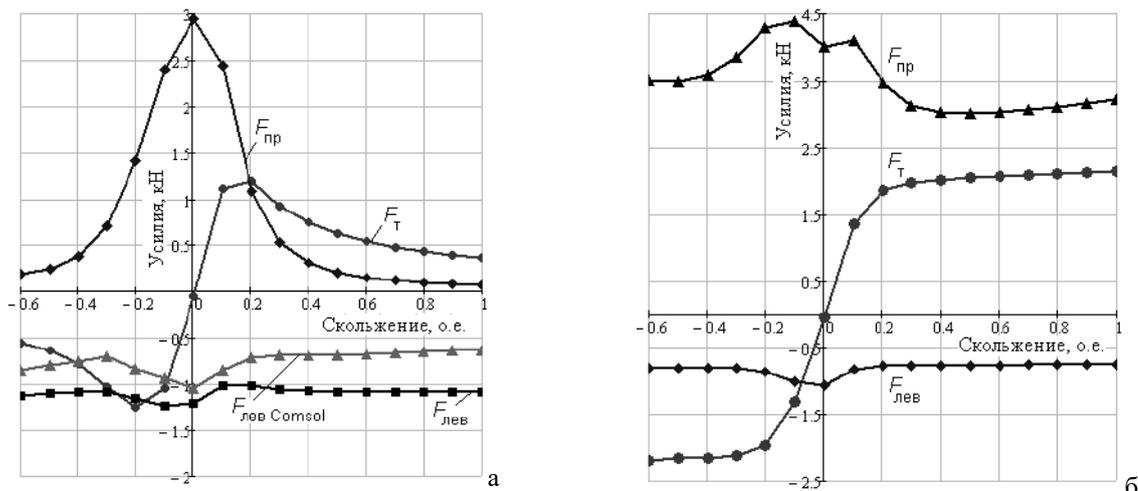


Рис.3. Зависимости тяговых и нормальных усилий (притяжения и левитации) от скольжения: а) $B_{se} = 0.7$ м, $B_i = 0.48$ м; б) $B_{se} = B_i = 0.48$ м

На рис. 4 показаны тяговые характеристики ЛАД, полученные с помощью метода ДМСЗ при различном количестве выделенных по толщине слоев в сечении двигателя, а также с помощью полевого пакета Comsol Multiphysics. Можно за-

ключить, что расчеты при помощи метода детализированных схем замещения дают результаты, близкие к результатам расчета на основе полевого пакета.

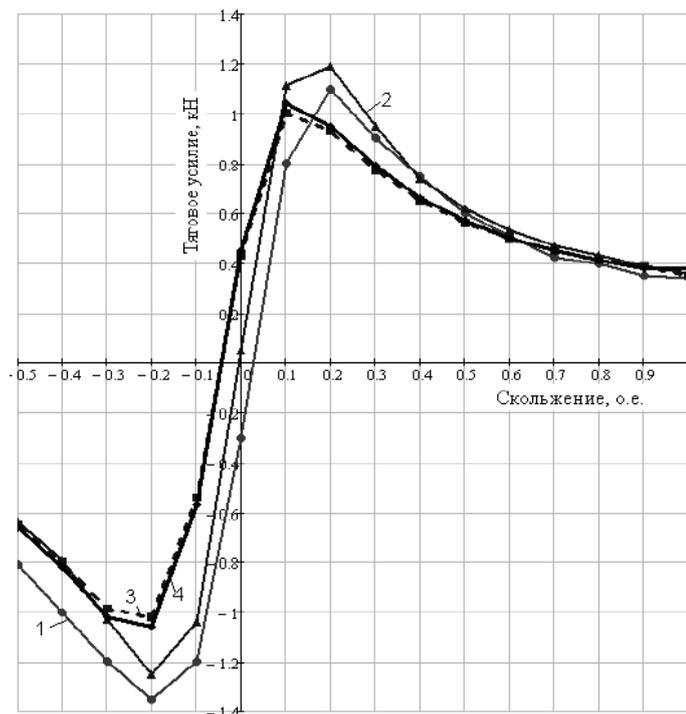


Рис. 4. Механические характеристики ЛАД, $B_{se} = 0.7$ м, $B_i = 0.476$ м
1 – полевой пакет Comsol, 2 – 2-слойная модель ДМСЗ, 3 – 6-слойная модель ДМСЗ, 4 – 14-слойная модель ДМСЗ

Как отмечалось выше, для повышения точности при использовании наиболее простой двухслойной ДМСЗ введена уточненная запись производной по продольной координате [6]. На рис. 4 показаны механические характеристики ЛАД, полученные при различных допущениях на осно-

ве двухслойной ДМСЗ при ширине индуктора и ВЭ $B_i = B_{se} = 1$ м.

Как видно, наибольшую погрешность дает вариант с $q = 1$ без уточнений в вычислении производной по координате. Переход к вариантам с более мелким шагом разбиения по координате,

уточнением формулы вычисления производной по координате, или тем и другим позволяет получить результаты, близкие к полученным с по-

мощью полевого пакета во всем диапазоне скольжений.

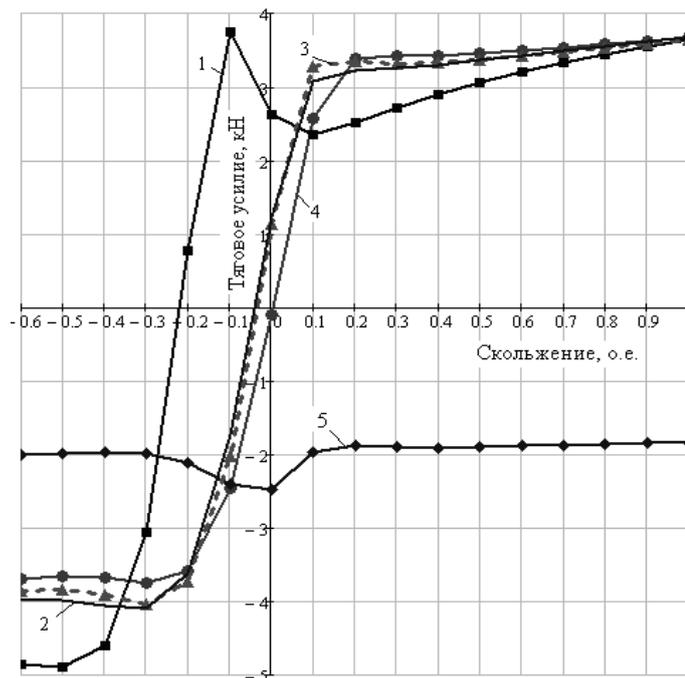


Рис.5. Зависимости тяговых и нормальных усилий от скольжения, полученные на основе 2-х-слойной ДМСЗ: 1) $q=1$; 2) $q=2$; 3) $q=1$, коррекция по [5] производной по координате; 4) $q=2$, коррекция производной по координате; 5) усилие левитации

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно заключить, что метод детализированных магнитных схем замещения дает широкие возможности для анализа динамических и статических характеристик линейных асинхронных двигателей при достаточно высокой точности результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Веселовский, О.Н. Линейные асинхронные двигатели / О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 256 с. .
- [2] Ямамура, С. Теория линейных асинхронных двигателей / С. Ямамура. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 180 с.
- [3] Gieras, J.F. Linear Synchronous motors / J.F. Gieras, Z.J. Piech, B.Z. Tomczuk. - New York, USA: CRC press 2012.
- [4] Ostovic, V.: Dynamics of Saturated Electric Machines / V. Ostovic. - New York, USA: Springer-Verlag, 1989.
- [5] Иванушкин, В.А.. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов / В.А. Иванушкин, Ф.Н. Сарапулов, П. Шымчак. - Щecin: ЦТУ, 2000. 310 с.
- [6]. Shiri, A. Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, Considering All Phenomena / A. Shiri, A. Shoulaie - IEEE

TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 27, NO. 2, JUNE 2012.

- [7]. Dmitrievskii V. Choice of a numerical differentiation formula in detailed equivalent circuits models of linear induction motors / V. Dmitrievskii; V. Goman; F. Sarapulov; V. Prakht; S. Sarapulov - 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives. - Automation and Motion (SPEEDAM), 22-24 June 2016. Page(s): 458- 463.
- [8]. Захарченко П.И. Особенности структуры и режимов работы линейного электропривода конвейерного (тележечного) поезда / П.И. Захарченко, С.В. Карась, Ф.Н. Сарапулов. - Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ / Под общей ред. академ. НАН Украины Г.Г. Пивняка. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. С. 331-343.