

**ĐẠI HỌC THÁI NGUYÊN
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG**

**DỤNG CỦA ĐỘNG CƠ TUYẾN TÍNH TRONG CÁC HỆ THỐNG SẢN
XUẤT LINH HOẠT**

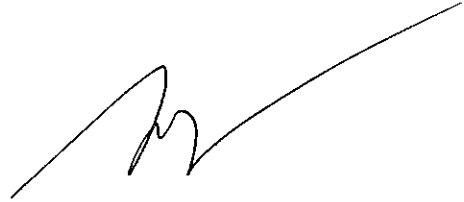
Mã số: T2022-B05

Xác nhận của tổ chức chủ trì
**KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG**



PGS.TS. Vũ Ngọc Pi

Chủ nhiệm đề tài
(ký, họ tên)



TS. Nguyễn Hồng Quang

Thái Nguyên, 10/2023

NHỮNG NGƯỜI THAM GIA THỰC HIỆN ĐỀ TÀI

TS. Đặng Danh Hoằng – Khoa CN Cơ điện và ĐT – Trường ĐHKT Công nghiệp.

TS. Nguyễn Thị Việt Hương - Trường Cao đẳng Công nghiệp Thái Nguyên

TRƯỜNG ĐẠI HỌC
KỸ THUẬT CÔNG NGHIỆP
Đơn vị: Khoa CN Cơ điện và điện tử

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: Ứng dụng của động cơ tuyến tính trong các hệ thống sản xuất linh hoạt
- Mã số: T2022-B05
- Chủ nhiệm đề tài: Nguyễn Hồng Quang
- Cơ quan chủ trì: Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp.
- Thời gian thực hiện: 04/2022 – 04/2023

2. Mục tiêu:

Hiện nay trong các hệ chuyển động đa trục động cơ tuyến tính đang từng bước thay thế cho các hệ thống tạo chuyển động thẳng gián tiếp. Đề tài tập trung vào phân tích khả năng áp dụng động cơ tuyến tính trong các hệ chuyển động đa trục.

3. Kết quả nghiên cứu:

Phân tích khả năng ứng dụng của động cơ tuyến tính trong hệ điều khiển chuyển động.

4. Sản phẩm:

- Sản phẩm đào tạo:
- Sản phẩm khoa học: 01 bài báo ISSN.
- Sản phẩm ứng dụng:

5. Hiệu quả:

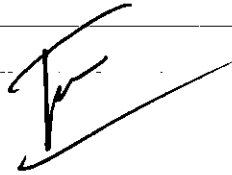
Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả được công bố trên các tạp chí khoa học có uy tín nằm trong danh mục ISSN.

6. Khả năng áp dụng và phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu:

Cung cấp tài liệu chuyên ngành tham khảo cho sinh viên, học viên cao học, nghiên cứu sinh ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, ngành Công nghệ KTD-ĐT. Các kết quả của đề tài có thể sử dụng để hướng dẫn đề tài luận văn cao học cho học viên ngành Kỹ thuật điều khiển và Tự động hóa, ngành Công nghệ KTD-ĐT.

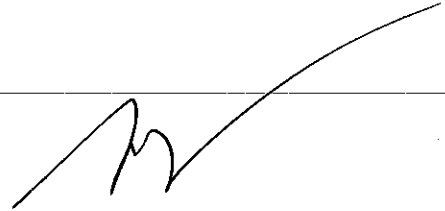
Ngày tháng năm 202

Cơ quan chủ trì
KT.HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG



PGS.TS. Vũ Ngọc Pi

Chủ nhiệm đề tài



TS. Nguyễn Hồng Quang

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

- Project title: Applications of linear motors in flexible manufacturing systems.
- Code number: T2022-B05
- Coordinator: Nguyen Hong Quang
- Implementing Institution: Thai Nguyen University of Technology.
- Duration: From 04/2022 – to 04/2023.

2. Objectives:

Currently, in multi-axis motion systems, linear motors are gradually replacing indirect linear motion systems. The project analyzes the possibility of applying linear motors in multi-axis motion systems.

3. Research results:

Analyze the applicability of linear motors in motion control systems.

4. Products:

- Training products:
- Scientific products: 01 ISSN paper.
- Application products:

5. Effects:

Research results of the authors group are published in prestigious scientific journals in the ISSN list.

6. Transfer alternatives of reserach results andapplic ability:

Provide specialized reference materials for students, graduate students, PhD students in Automation Engineering. The research results can be used to guide the master thesis for graduate students in Automation Engineering.

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
Lsd, Lsq	H	điện cảm stator dọc trục và ngang trục
m	kg	khối lượng rotor
u_s, i_s	V, A	vector điện áp stator, dòng điện stator
i_s^s, i_s^s	A	vector i_s : Trên hệ tọa độ dq, $\alpha\beta$
v, v_e	m/s	vận tốc cơ, vận tốc điện
R_s	Ω	điện trở stator
i_{sa}, i_{sp}	A	Thành phần dòng stator trục α , trục β
i_{sd}, i_{sq}	A	dòng điện trục dq
u_{sa}, u_{sq}	V	điện áp trục dq
u_s^s, u_s^s	V	Vector u_s : Trên hệ tọa độ dq, $\alpha\beta$
τ	mm	bước cực
p		số đôi cực
ν_s	rad	góc pha từ thông
Ψ_s, Ψ_p	Wb	từ thông stator và rotor
x, x_0	mm	vị trí và vị trí ban đầu động cơ tuyến tính
Chữ viết tắt		Ý nghĩa
DCTT		Động cơ tuyến tính
ĐBKTV C		Đồng bộ kích thích vĩnh cửu
T ⁴ R		Tựa theo từ thông rotor
FOC		Điều khiển tựa từ thông rotor
SVM		Điều chế vector không gian
TTHCX		Tuyến tính hoá chính xác

ĐB-KTVC

Đồng bộ - kích thích vĩnh cửu

ĐCD

Điều chỉnh dòng

ĐC, ĐK

Điều chỉnh, điều khiển

TKTT

Tách kênh trực tiếp

PHTT

Phản hồi trạng thái

VĐK

Vị điều khiển

MIMO

Multi input – multi output

Đặt vấn đề:

Truyền động điện có vai trò vô cùng quan trọng trong tất cả các ngành công nghiệp, chúng tạo thành các thành phần cốt lõi của máy móc ở các nhà máy. Các hệ thống truyền động điện với nhiệm vụ tham gia thực hiện các công đoạn của quá trình công nghệ. Trong đó phần tử trung tâm không thể thiếu được trong các hệ thống truyền động điện chính là động cơ điện. Các loại động cơ được sử dụng trong hệ thống truyền động điện rất đa dạng có thể được kể ra ở đây như động cơ một chiều (ĐCMC), động cơ không đồng bộ (ĐCKĐB), động cơ bước, động cơ servo,... Các động cơ quan trọng truyền thống thì đầu ra ta nhận được chính là tốc độ quay và momen trên đầu trục động cơ. Với sự phát triển của khoa học công nghệ các dây chuyền công nghệ lắp ráp tự động ngày càng trở nên linh hoạt, yêu cầu cao về độ chính xác vị trí, tốc độ và tác động nhanh. Sự xuất hiện của tay máy Robot, máy nâng hạ, máy công cụ kỹ thuật số CNC trong các dây chuyền đã trở thành một điều tất yếu. Chính điều đó đã thúc đẩy truyền động điện phải quan tâm tới một dạng chuyển động mới không còn bó buộc trong chuyển động quay tròn truyền thống nữa đó chính là truyền động thẳng.

Động cơ Polysolenoid động cơ tuyến tính đồng bộ kích thích vĩnh cửu với kết cấu hình ống. Việc nghiên cứu nó không thể tách rời được với những tính chất cơ bản của động cơ tuyến tính đã được nghiên cứu phát triển.

PHẦN 1. TỔNG QUAN VỀ ĐỘNG CƠ TUYẾN TÍNH VÀ HIỆU ỨNG ĐẦU CUỐI .

Đặt vấn đề: Đối tượng tạo ra chuyển động thẳng trực tiếp được sử dụng hiện nay trong công nghiệp sử dụng trực tiếp điện năng biến đổi thành cơ năng chính là động cơ tuyến tính. Trong nội dung phần này ta sẽ đi tìm hiểu hoàn cảnh xuất hiện và các ứng dụng của động cơ tuyến tính sử dụng trong công nghiệp.

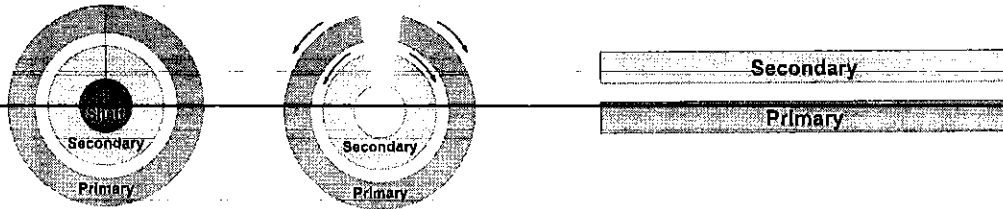
1.1 Hoàn cảnh lịch sử xuất hiện của động cơ tuyến tính.

Theo [1-4] nguyên lý cơ bản của động cơ tuyến tính được đưa ra vào khoảng năm 1840 bởi Charles Wheatstone là một nhà khoa học người Anh. Năm 1889 hai nhà khoa học người Mỹ là Schuyler S. Wheeler và Charles S. Bradley đã xin cấp bằng sáng chế về việc ứng dụng nguyên lý của động cơ tuyến tính đồng bộ và dị bộ vào hệ thống tàu điện. Bằng sáng chế tại Mỹ đầu tiên được cấp cho nhà sáng chế người Đức là Alfred Zehden vào năm 1902 và 1907 là việc sử dụng động cơ tuyến tính trên hệ thống đường sắt. Một loạt các bằng sáng chế tại Đức cho tàu đệm từ được cấp cho Hermann Kemper từ năm 1935 đến 1941. Đến cuối những năm 1940 giáo sư Eric Laithwaite tại viện nghiên cứu Hoàng gia Anh đã đưa ra được mô hình thực tế động cơ làm việc được và nó được ứng dụng trong hệ thống máy dệt công nghiệp. Với việc chế tạo thành công động cơ tuyến tính đầu tiên này đã dành được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học và nó được coi là Máy điện của tương lai.

1.2 Nguyên lý làm việc của động cơ tuyến tính .

Để hiểu rõ hơn về động cơ tuyến tính chúng ta có thể hình dung ra một động cơ quay tròn bất kỳ nào khi tăng bán kính của động cơ đến vô cùng ta sẽ thu được hình ảnh Rotor và Stator song song với nhau. Trong chuyển động tương đối khi chọn gốc tọa độ gắn với hệ quy chiếu nào ta sẽ suy ra được chuyển động tương đối của thành phần còn lại so với gốc tọa độ. Với quan điểm như vậy động cơ tuyến tính sẽ gồm hai thành phần: Thành phần thứ nhất nhận dòng năng lượng điện đi tới (phần sơ cấp), thành phần thứ hai là dòng năng lượng đưa ra dưới dạng cơ năng (phía thứ cấp). Từ quan điểm trên ta có thể thấy với động cơ tuyến tính

phần tạo chuyển động thẳng có thể là phần Stator hay phần Rotor của máy điện quay truyền thống, từ đó tạo ra những động cơ tuyến tính tương ứng.



Hình 1. Nguyên lý chuyển đổi từ động cơ quay sang động cơ tuyến tính.

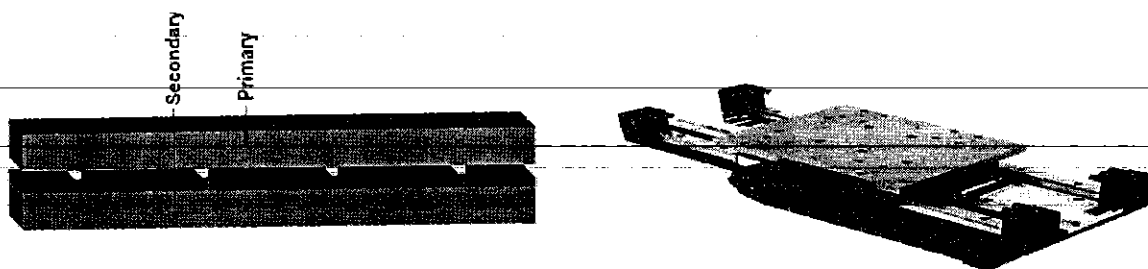
Từ nguyên lý cơ bản trên động cơ tuyến tính được phát triển với cấu tạo khác nhau tương ứng dựa vào mục đích sử dụng. Việc lựa chọn động cơ tuyến tính phụ thuộc vào thuộc tính và nguyên tắc hoạt động của chúng.

Ban đầu động cơ tuyến tính chủ yếu được sử dụng cho hệ thống giao thông vận tải. Hiện nay động cơ tuyến tính được sử dụng để thay thế một hệ thống sử dụng động cơ quay và các thiết bị cơ khí để tạo ra một chuyển động thẳng trực tiếp.

1.3 Các dạng cấu tạo của động cơ tuyến tính.

Từ nguyên lý cơ bản như trên ta chế tạo được các dạng động cơ tuyến tính khác nhau từ yêu cầu thực tế công nghệ. Tuy nhiên ta có thể chia làm ba dạng chính như sau.

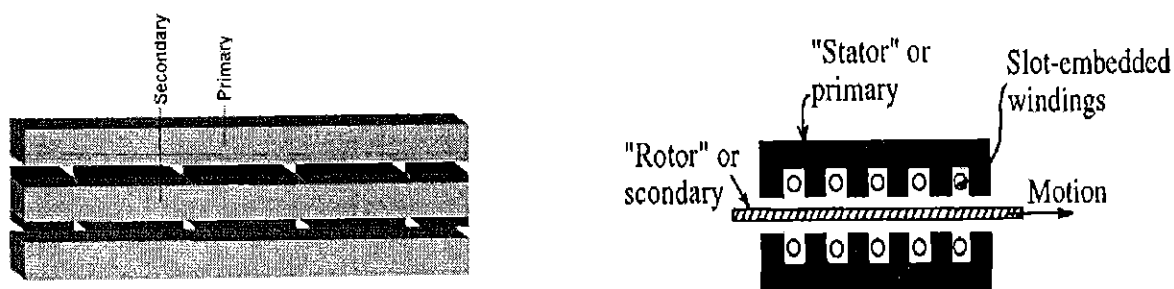
Dạng thứ nhất: *Single-sided* (Động cơ tuyến tính phẳng với một mặt trượt đơn)
Động cơ này bao gồm một thành phần sơ cấp (phần động), một thành phần thứ cấp (Phần tĩnh).



Hình 2. Single-slided linear motor.

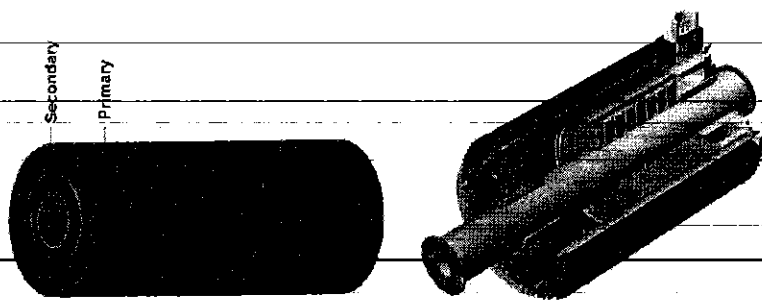
Khái niệm Stator thường được dùng để chỉ phần tĩnh trong máy điện tuy nhiên ở động cơ tuyến tính Stator lại là phần động. Trong trường hợp này Stator mang ý nghĩa là phần nhận điện năng từ nguồn cung cấp. Với động cơ tuyến tính đại đa số hệ thống cuộn dây đều nằm ở phần động. Phần Rotor lúc này đóng vai trò là phần tĩnh, trải dài theo toàn bộ chiều dài của máy điện (Hệ thống vòng ngắn mạch của động cơ tuyến tính không đồng bộ, hệ thống nam châm vĩnh cửu của động cơ tuyến tính kích thích vĩnh cửu).

Dạng thứ hai: Double-sided (Động cơ tuyến tính phẳng có dạng kết cấu răng lược) Thông thường phần sơ cấp chính là thành phần Stator được bố trí đối xứng (dạng răng lược) phần tạo chuyển động là phần Rotor (phần thứ cấp)



Hình 3. Double-slided linear motor

Dạng thứ ba: Tubular linear motor (Động cơ tuyến tính có kết cấu dạng hình ống). Xuất phát từ ý tưởng cuộn tròn động cơ tuyến tính dạng phẳng một mặt trượt đơn quanh một trục thẳng, kết quả thu lại sẽ được một động cơ hình ống.



Hình 4. Tubular linear motor

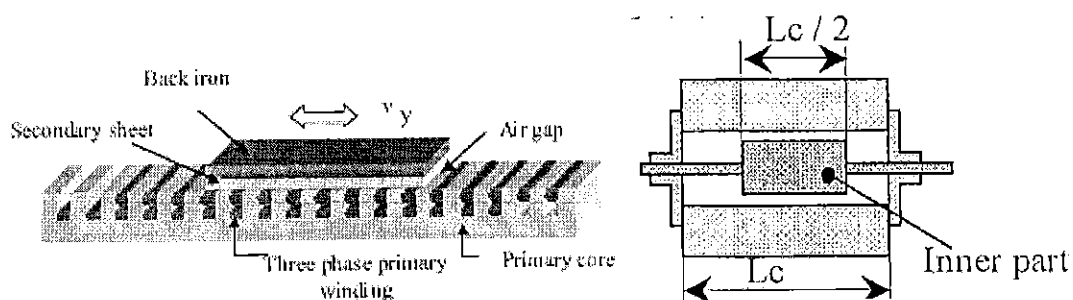
1.4 Phân loại động cơ tuyến tính.

Như đã phân tích ở phần trước động cơ tuyến tính được phát triển từ động cơ động cơ quay tròn truyền thống nên nó có những nét tương đồng với những động cơ tương ứng tuy nhiên nó cũng có những đặc điểm khác biệt đặc trưng.

Các loại động cơ tuyến tính chủ yếu được phát triển từ bốn loại động cơ : Động cơ xoay chiều ba pha không đồng bộ, động cơ đồng bộ, động cơ một chiều không chổi than (BLDC), động cơ Servo

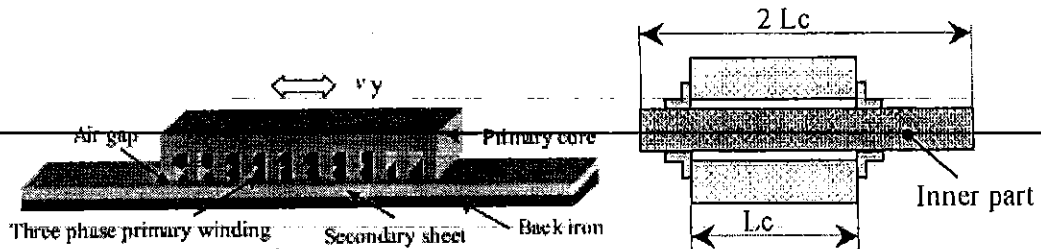
Hai cấu hình được sử dụng tương ứng được triển khai tương ứng có thể được triển khai ở đây được đưa ra.

Dạng Stator dài : Chiều dài của phần cung cấp thường lớn hơn nhiều lần phần kích thích (cảm ứng), đa số trong các trường hợp thì phần kích thích chính là phần chuyển động.



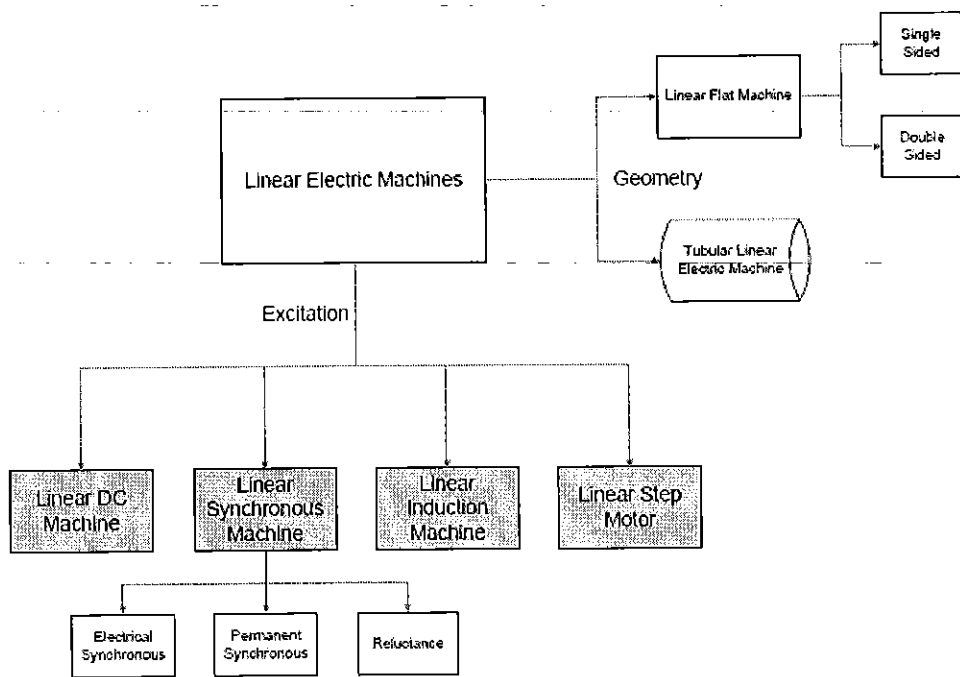
Hình 5. Động cơ tuyến tính dạng Stator dài dạng phẳng và dạng ống

Dạng Stator ngắn: Chiều dài của phần cung cấp ngắn hơn phần kích thích (cảm ứng), đa số trong các trường hợp thì phần cung cấp chính là phần chuyển động.



Hình 6. Động cơ tuyến tính dạng Stator ngắn dạng phẳng và dạng ống

Tổng hợp lại ta có cách phân loại động cơ tuyến tính theo nguyên lý cấu tạo và kết cấu hình học như sau



Hình 7. Phân loại động cơ tuyến tính theo nguyên lý làm việc và kết cấu hình học.

Theo tài liệu [4] ta có bảng so sánh tổng thể lực đẩy sinh ra của các loại động cơ tuyến tính có thể sinh ra.

Loại động cơ	Lực đẩy sinh ra
Động cơ tuyến tính loại không đồng bộ	1-2 N/cm ²
Động cơ tuyến tính đồng bộ kích thích vĩnh cửu (kiểu răng lược)	Lên đến 6 N/cm ²
Động cơ tuyến tính đồng bộ kích thích vĩnh cửu (dạng phẳng)	Lên đến 3 N/cm ²
Động cơ tuyến tính từ trở	1,5 N/cm ²
Động cơ tuyến tính thông lượng ngang	3 N/cm ²

Xét về khả năng tạo lực đẩy thì động cơ tuyến tính làm việc theo nguyên lý đồng bộ kích thích vĩnh cửu có khả năng tạo lực đẩy lớn hơn động cơ tuyến tính làm việc với nguyên lý không đồng bộ. Tuy vậy giá thành cũng là một yếu tố cân nhắc khi lựa chọn động cơ tuyến tính cho đối tượng công nghệ.

1.5 Hiệu ứng đầu cuối (End effect)

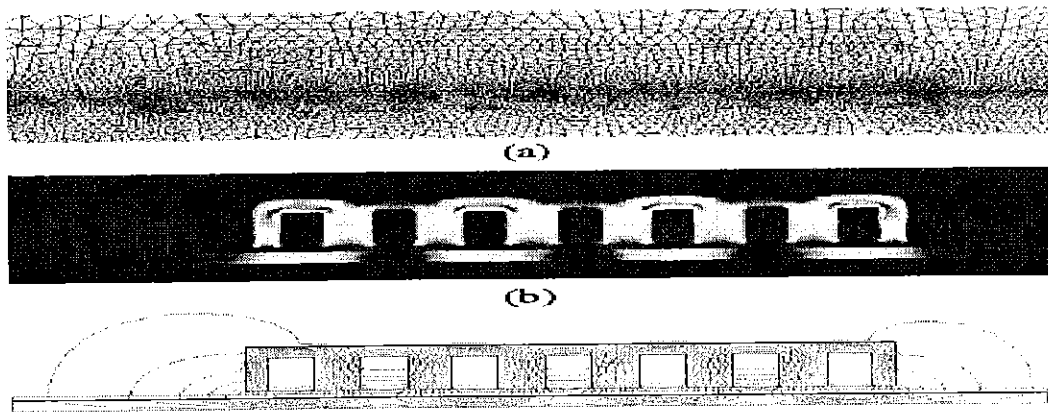
Như đã phân tích trong các phần trên động cơ tuyến tính có những nét tương đồng so với những động cơ quay tương ứng phát triển nên nó nhưng trong đó còn những điểm khác biệt do cấu tạo khác biệt của hai loại quay và động cơ tạo chuyển động thẳng. Một khác biệt cơ bản ở đây chính là hiệu ứng đầu cuối ở động cơ tuyến tính (end effect) mà động cơ quay không có.

Hiệu ứng đầu cuối trong động cơ tuyến tính có thể được hiểu như sau: đó là sự phân biệt giữa các khu vực đầu và cuối với các điểm nằm giữa về diễn biến điện từ gây ảnh hưởng đến từ thông và lực do động cơ tuyến tính sinh ra (do tính chất mạch từ hở của động cơ tuyến tính). Điều này làm thay đổi quan điểm về giả thiết về sức từ động hình sin trong động cơ quay truyền thống. Có ba đặc điểm cần đặc biệt lưu tâm về hiệu ứng đầu cuối:

Thứ 1: Với động cơ tuyến tính dạng không đồng bộ ngoài hiệu ứng đầu cuối (điểm đầu và điểm cuối phần kích thích) còn có sự ảnh hưởng về từ trường ở hai biên. Còn ở động cơ tuyến tính dạng đồng bộ chỉ chịu tác động của hiệu ứng đầu cuối. Với động cơ tuyến tính dạng không đồng bộ chịu tác động của hiệu ứng đầu cuối mạnh hơn.

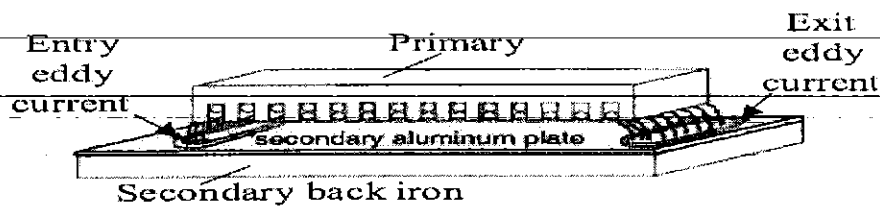
Thứ 2: Tại điểm đầu và điểm cuối của phần kích thích từ thông sinh ra bị ảnh hưởng bởi dòng xoáy phía thứ cấp (ĐCTTKĐB) làm ảnh hưởng đến từ trường khe hở không khí phân bố tại điểm đầu và điểm cuối của phần kích thích. Với động cơ đồng bộ kích thích vĩnh cửu thì sự phân bố từ trường tại hai đầu của phần kích thích bị suy giảm (do kết cấu đặc trưng của ĐCTT). Diễn biến này khác nhau phụ thuộc vào tốc độ của động cơ (độ lớn của dòng phía bên kích thích)

Thứ 3: Sự xuất hiện hay kết thúc đột ngột của dòng xoáy phía cảm ứng (tương ứng với sự xuất hiện hay kết thúc của dòng phía kích thích). Gây ra phản ứng dọc trục gây ra sự thay đổi tốc độ của động cơ (nhấp nhô về tốc độ). Đây cũng là một điểm rất đáng chú ý trong động cơ tuyến tính.

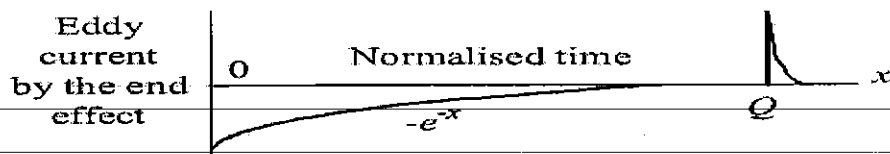


Hình 8. Sự phân bố từ thông bên trong động cơ tuyến tính dạng

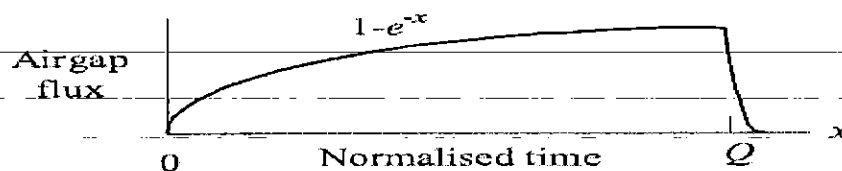
Sator ngắn làm việc theo nguyên lý cảm ứng



(a)



(b)

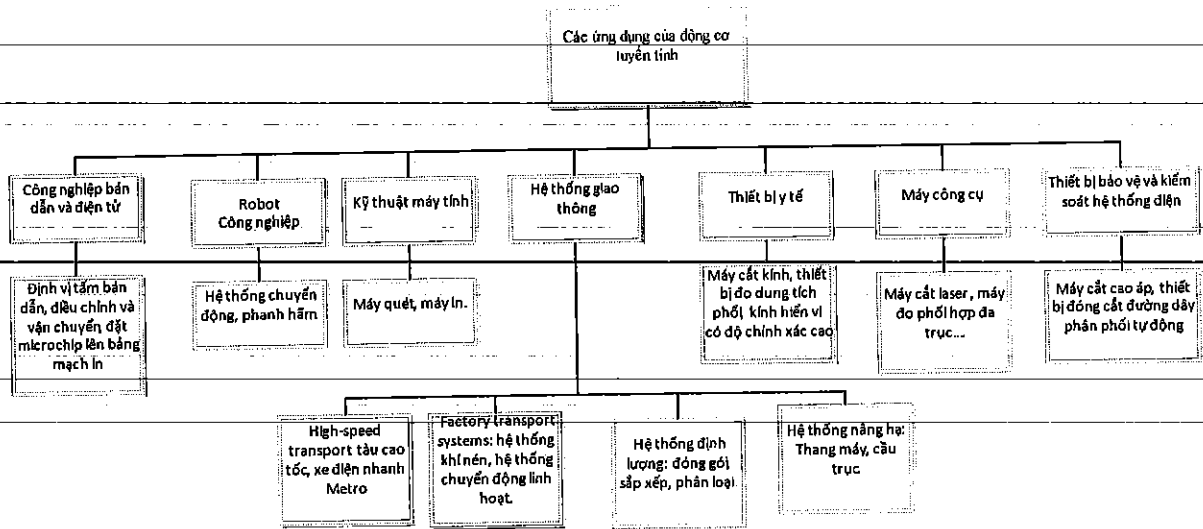


Hình 9. Hiệu ứng dòng xoáy và từ thông khe hở không khí.

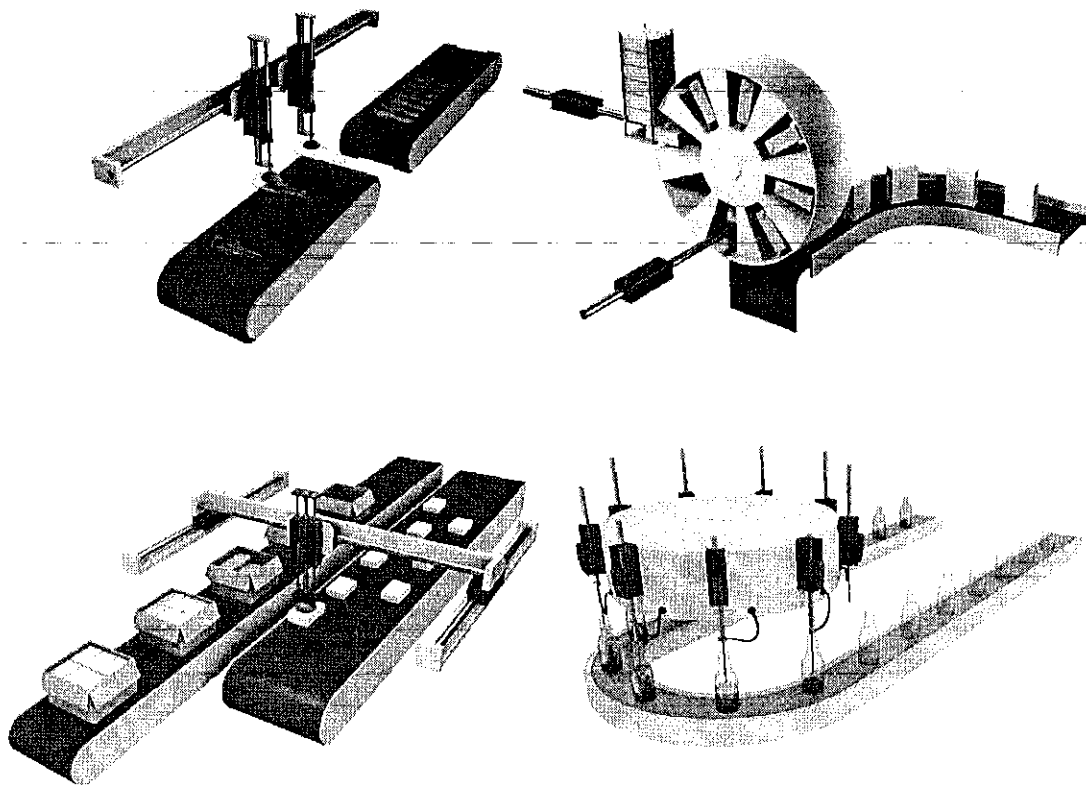
Hiệu ứng đầu cuối là một điểm đặc trưng của động cơ tuyến tính khác so với các loại động cơ khác. Trong bài toán điều khiển tốc độ động cơ tuyến tính thì hiệu ứng đầu cuối (end effect) phải được quan tâm và giải quyết triệt để. Mục tiêu được đặt ra ở đây là làm rõ tính chất của hiệu ứng đầu cuối xảy ra trong động cơ tuyến tính.

1.6 Những ứng dụng của động cơ tuyến tính đã được áp dụng trong thực tiễn.

Động cơ tuyến tính hiện đã được ứng dụng trong thực tiễn ở mọi dải công suất. Ở dải công suất lớn chúng hiện diện trong cơ cấu truyền động dùng trong các phương tiện giao thông như tàu điện, xe bus nhanh (Metro). Trong dải công suất trung bình và nhỏ nó được ứng dụng trong việc điều khiển tự động máy công cụ kỹ thuật số CNC, điều khiển tay máy Robot, máy nâng hạ, điều khiển các hệ thống sản xuất linh hoạt yêu cầu cao về độ chính xác vị trí, tốc độ và tác động nhanh. Trong dải công suất nhỏ được sử dụng trong thiết bị như máy in, máy cắt laser sử dụng trong phẫu thuật,



Hình 10. Các ứng dụng của động cơ tuyến tính.



Hình 11. Các ứng dụng trong một dây chuyền sử dụng động cơ tuyến tính.

Các động cơ tuyến tính khi được kết hợp vào modul, chúng được kết hợp một cách nhanh chóng để tạo thành một hệ thống chuyển động đa trục. Việc can thiệp vào dây chuyền cũng như tùy chỉnh quá trình công nghệ sẽ trở nên đơn giản hơn khi các động cơ được kết nối với hệ thống điều khiển trung tâm.

Kết luận:

Trong phần này ta đã tìm hiểu được nguyên lý hoạt động và cấu tạo cơ bản của động cơ tuyến tính. Phân tích được những đặc điểm tương đồng cũng như những đặc điểm riêng chỉ tồn tại trong động cơ tuyến tính so với các động cơ quay truyền thống. Việc làm rõ những khái niệm này nhằm thực hiện những mục tiêu sau:

- Phân tích những ưu nhược điểm khi sử dụng động cơ tuyến tính trong các hệ tạo chuyển động thẳng trực tiếp.
- Tạo cơ sở cho quá trình mô tả toán học cho động cơ tuyến tính.
- Hiểu về đặc tính đầu cuối trong động cơ tuyến tính từ đó tìm ra các phương pháp khắc phục hiện tượng này nhằm nâng cao chất lượng điều khiển.

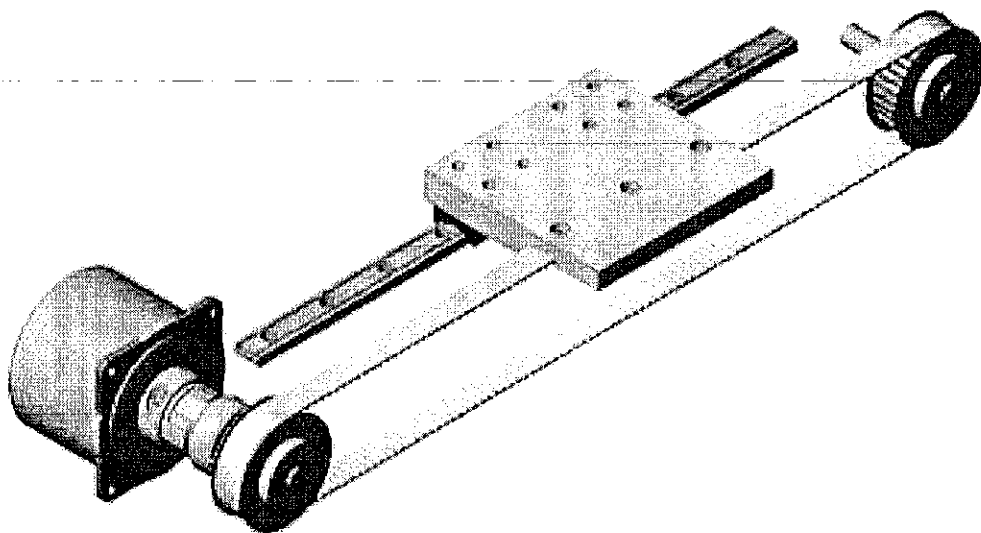
PHẦN 2: TRUYỀN ĐỘNG TUYẾN TÍNH VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRUYỀN ĐỘNG TUYẾN TÍNH.

Đặt vấn đề:

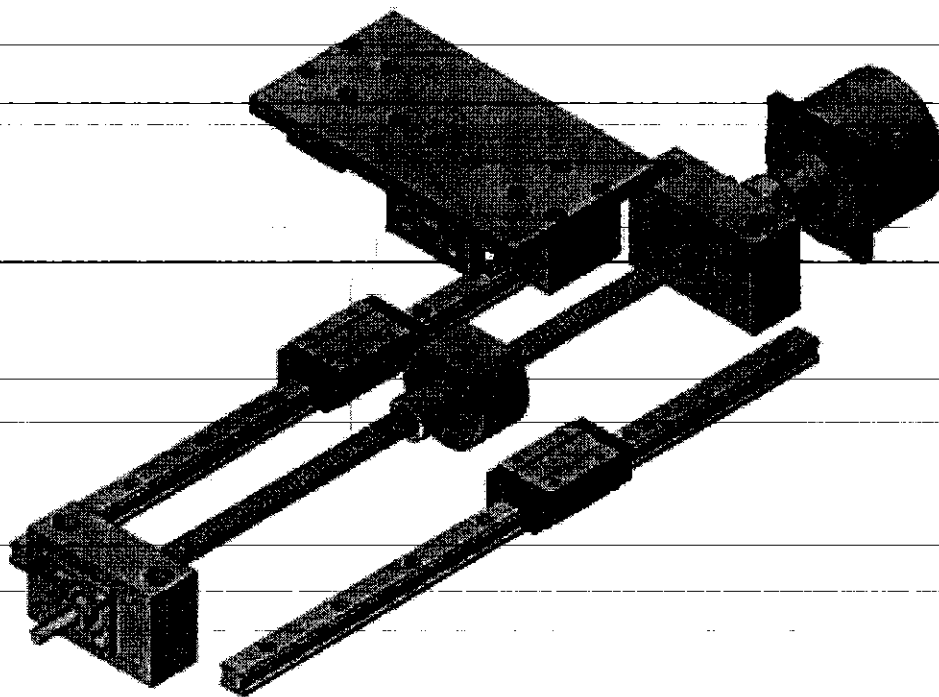
Trong nội dung phần trước ta đã tìm hiểu về nguyên lý hoạt động của động cơ tuyến tính. Phần này tập trung vào việc làm rõ cách thức phương pháp ứng dụng động cơ tuyến tính trong các hệ truyền động tạo chuyển động thẳng trực tiếp và các phương pháp đã được sử dụng trong điều khiển trong các hệ truyền động này.

2.1 Các đặc điểm của một truyền động tuyến tính.

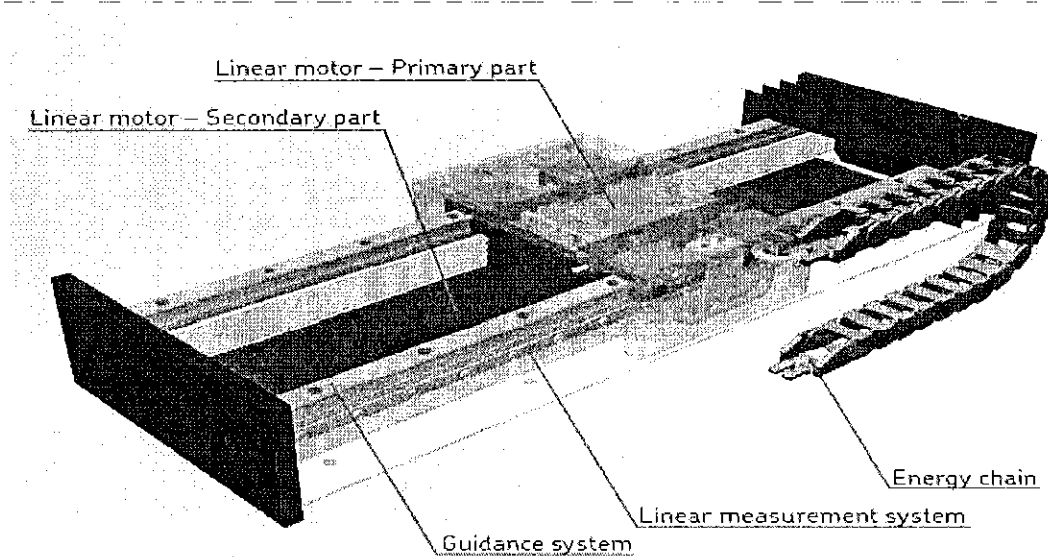
Truyền động tuyến tính được hiểu là tạo ra một truyền động thẳng cho các đối tượng công nghệ. Để tạo ra truyền động thẳng có hai phương pháp là phương pháp gián tiếp và phương pháp trực tiếp



Hình 12. Tạo chuyển động thẳng sử dụng đai truyền



Hình 13. Tạo chuyển động thẳng sử dụng trục vít



Hình14. Tạo chuyển động thẳng sử dụng động cơ tuyến tính

Từ các hình ảnh sử dụng các phương pháp để tạo ra chuyển động tuyến tính trên ta có một số nhận xét như sau:

Phương pháp tạo ra chuyển động tuyến tính gián tiếp: Nguồn động lực được sử dụng ở đây là các động cơ quay tròn. Để tạo ra chuyển động thẳng đưa tới cơ cấu sản xuất thông qua các phần tử cơ khí trung gian như (đai truyền, hộp số, trục vít, ...) do vậy nó tồn tại những nhược điểm đáng kể

- Kết cấu cơ khí phức tạp do tồn tại các phần tử trung gian, độ chính xác của hệ thống thấp do sai số tích lũy của các phần tử có trong toàn hệ thống,

- Hiệu suất của hệ thống thấp.

- Khả năng động học của hệ thống thấp do tồn tại những dao động riêng của các phần tử trung gian.

Phương pháp tạo ra chuyển động tuyến tính trực tiếp: Ở phương pháp này động cơ tuyến tính được sử dụng để tạo ra chuyển động thẳng trực tiếp. Khi sử dụng động cơ tuyến tính hệ thống sẽ khắc phục được những nhược điểm của phương pháp tạo chuyển động tuyến tính gián tiếp. Được thể hiện trong những mặt sau:

- Đơn giản về mặt kết cấu cơ khí do loại bỏ được các phần tử trung gian do đó giảm được chi phí bảo dưỡng vận hành.

- Hiệu suất của hệ thống được nâng cao do vậy độ chính xác của hệ cũng nâng lên.

- Đặc tính động học của hệ được nâng cao, loại được các dao động riêng của các phần tử trung gian.

- Tăng được giới hạn trên về lực đẩy và gia tốc.

Tuy nhiên với hệ thống sử dụng động cơ tuyến tính vẫn còn tồn tại một số nhược điểm như sau:

- Giải pháp làm mát phức tạp.

- Khó chuẩn hóa (thường được sử dụng trong các máy chuyên dụng) nên hệ thống có giá thành cao.

Từ những phân tích trên ta thấy rằng khi sử dụng động cơ tuyến tính mặc dù có nhiều ưu điểm nhưng vẫn còn tồn tại những nhược điểm cố hữu của nó. Đặc biệt là về giá thành của một hệ thống động cơ tuyến tính khi ứng dụng vào các hệ thống. Điều này sẽ được giải quyết nếu như số lượng của động cơ tuyến tính được sản xuất hàng loạt tại các nhà máy sản xuất động cơ tuyến tính. Chính vì vậy trong thời gian gần đây các nghiên cứu để đưa động cơ tuyến tính vào các dây chuyền sản xuất tự động đang được sự quan tâm đặc biệt và tiềm năng tham gia của động cơ tuyến tính đã bắt đầu được khai thác.

Chuyển động tuyến tính không chỉ đơn thuần là một chuyển động riêng lẻ, khi phối hợp các chuyển động tuyến tính với nhau để tạo thành hệ chuyển động tuyến tính áp dụng cho các công nghệ thực tế khi đưa vào triển khai trong sản xuất mới đem lại những hiệu quả thiết thực. Đó là tiền đề để động cơ tuyến tính ngày càng được ứng dụng rộng rãi hơn.

2.2 Điều khiển truyền động tuyến tính.

2.2.1 Yêu cầu đặt ra với bài toán điều khiển truyền động tuyến tính.

Những tiềm năng cũng như vận dụng của động cơ tuyến tính trong công nghiệp ngày càng phát triển vì những ưu điểm vượt trội về chất lượng động học cũng như khả năng tự động hóa cao trong các dây chuyền sản xuất. Một yếu tố rất được quan tâm ở đây chính là độ chính xác về vị trí của các hệ thống khi sử dụng động cơ tuyến tính, đây là bài toán liên quan đến vận tốc, gia tốc, thời gian đáp ứng, khả năng dừng chính xác. Để giải toán này chính là yêu cầu đặt ra với việc thiết kế bộ điều khiển cho đối tượng động cơ tuyến tính. Chính vì vậy song hành với các thiết bị phần cứng thì nhiệm vụ thiết kế bộ điều khiển cho động cơ tuyến tính chính là một yêu cầu cấp thiết được đặt ra.

Đây chính là vấn đề nhận được rất nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu trong thời gian gần đây.

2.2.2 Khái quát về tình hình nghiên cứu về động cơ tuyến tính

2.2.2.1 Tình hình nghiên cứu động cơ tuyến tính trong nước.

- Về các công trình công bố trên các tạp chí khoa học trong nước có một số bài báo viết về vấn đề này nhưng mới chỉ dừng trên mức độ tổng quan về phương pháp điều khiển trên lý thuyết và mô phỏng trên Matlab Simulink.

- Các công trình luận án được nghiên cứu thực nghiệm trên thiết bị thực [61,62] được công bố dưới dạng luận văn tiến sỹ kỹ thuật.

Trong tài liệu [61] Đối tượng nghiên cứu được đề cập : Động cơ tuyến tính đồng bộ ba pha kích thích vĩnh cửu dạng phẳng (Stator ngắn). Những đóng góp của luận án được thể hiện ở các mặt. Đề xuất được phương pháp xác định đỉnh cực của trục tạo từ thông; Ứng dụng từ lý thuyết thiết kế bộ điều khiển phi-tuyến theo phương pháp Tuyến tính hóa chính xác và dựa trên nguyên lý phẳng. Xây dựng được hệ thống thí nghiệm chứng minh lý thuyết đã nghiên cứu.

Trong tài liệu [62] nghiên cứu lý thuyết về động cơ tuyến tính không đồng bộ ba pha từ đó thiết kế chế tạo ra động cơ. Những vấn đề quan tâm của luận án tập trung vào việc thiết kế cấu trúc và chế tạo động cơ không quan tâm nhiều đến những thuật toán điều khiển.

2.2.2.2 Tình hình nghiên cứu động cơ tuyến trên thế giới

Trong giai đoạn vừa qua, các phương pháp đã được thế giới tập trung nghiên cứu về điều khiển cho hệ truyền động tuyến tính phần lớn đều công nhận một kết luận gần đúng là tham số đầu vào không thay đổi trong một chu kỳ trích mẫu và tuyến tính hóa trong một chu kỳ gián đoạn. Đối tượng trong nhóm động cơ tuyến tính đồng bộ được tập trung nghiên cứu nhiều nhất là nhóm động cơ tuyến tính đồng bộ kích thích vĩnh cửu dạng phẳng với Stator ngắn tương ứng với mô hình của động cơ điện xoay chiều ba pha kích thích vĩnh cửu. Vì vậy các phương pháp vận dụng chủ yếu các phương pháp đã áp dụng thành công trong điều khiển động cơ xoay chiều ba pha kích thích vĩnh cửu sang mô hình tương ứng này.

Các nhóm vấn đề được quan tâm nghiên cứu:

Nhóm vấn đề thứ nhất: các phương pháp điều khiển đã được ứng dụng thành công cho nhóm động cơ quay.

+, *Nguyên tắc điều khiển vô hướng:* Ứng dụng luật điều khiển $U/f=\text{const}$ mục đích để tạo ra Momen tới hạn không đổi. Tuy nhiên phương pháp này còn tồn tại nhược điểm khi trường hợp quá tải xảy ra làm suy giảm từ thông khe hở không khí, khó khăn trong việc điều chỉnh tron tốc độ.

+, *Nguyên tắc điều khiển Vector:* Trong nhóm phương pháp này được chia làm hai nhánh là RFO và SFO tài liệu [1,2,3]. Nguyên tắc RFO là phương án được ứng dụng thành công và rộng rãi nhất trên các thiết bị thương mại đã được phát triển trên thị trường. Với phương pháp SFO được đề xuất vẫn còn những tồn tại những vấn đề không tương minh trong việc lựa chọn bảng đóng cắt, nghịch lưu yêu cầu tần số đóng cắt van lớn,.... Trong sản phẩm thương mại được ứng dụng nguyên tắc SFO đã được đưa vào thương mại hóa có biến tần ACS600 của ABB tuy nhiên với thiết bị này thuật toán điều khiển vẫn chưa được triệt để ở vùng tốc độ thấp vẫn phải sử dụng lý luận RFO.

Với phương pháp RFO cho phép phân tích thành phần dòng điện phía Stator thành hai thành phần tạo từ thông và momen (với động cơ quay tròn), thành phần tạo từ thông và thành phần tạo lực đẩy (với động cơ tuyến tính). Để phân tích thành phần dòng điện này thành hai thành phần riêng biệt thì điều cần thiết phải thực hiện được chính là xác định được vị trí từ thông trục Rotor (với động cơ quay), với động cơ tuyến tính chính là xác định được vị trí của đỉnh cực từ.

Nhóm vấn đề thứ 2: Phương pháp xác định cực của trục tạo từ thông Rotor.

Theo tài liệu [1] đã chỉ ra để áp dụng phương pháp điều khiển Vector thì việc xác định chính xác trục của từ thông phía Rotor đóng vai trò quyết định đến chất lượng điều khiển. Với nhóm động cơ làm việc theo nguyên lý không đồng bộ thì trục của từ thông không trùng với trục của Rotor do từ thông của trục Rotor khi chưa làm việc chưa hình thành nó chỉ hình thành khi động cơ đã làm việc. Với động cơ làm việc theo nguyên tắc đồng bộ kích thích vĩnh cửu thì trục của từ thông trùng với trục Rotor . Từ yêu cầu đặc điểm trên việc nhận

dạng từ thông cực của động cơ làm việc theo nguyên lý đồng bộ kích thích vĩnh cửu thuận lợi hơn so với động cơ làm việc theo nguyên lý không đồng bộ.

Theo tài liệu [19] sử dụng cơ cấu đo là cảm biến Hall để xác định từ thông trục Rotor của động cơ đồng bộ kích thích vĩnh cửu tại một thời điểm bất kỳ. Việc sử dụng cảm biến đem lại kết quả rất khả quan khi xác định được chính xác được vị trí đỉnh cực tại thời điểm bất kỳ nhưng một trong những khó khăn của phương pháp này chính là việc ghép nối cơ cấu cơ khí, làm tăng khoảng cách của khe hở không khí ảnh hưởng đến từ trường khe hở.

Phương pháp không sử dụng thiết bị đo được trình bày trong tài liệu[23,61] sử dụng chuỗi xung lực rời rạc tuần hoàn đủ lớn cung cấp cho vào bộ điều khiển lực đẩy khi đó giá trị đỉnh cực ước lượng sẽ hội tụ về giá trị đỉnh cực thực.

Nhóm vấn đề thứ 3: Mô hình hóa động cơ.

Việc mô hình hóa động cơ được thực hiện với động cơ tuyến tính tương ứng được thực hiện tương tự như các động cơ quay truyền thống với khác biệt gốc tọa độ trên phần chuyển động sẽ tịnh tiến theo trục chuyển động và bổ xung thêm mô hình hiệu ứng đầu cuối cho động cơ tuyến tính. Trong tài liệu [31,38] cũng chỉ ra rằng với các động cơ làm việc với nguyên lý giống nhau nhưng cấu tạo khác nhau cũng ảnh hưởng đến mô hình mô tả các động cơ này.

Nhóm vấn đề thứ 4: Lựa chọn nguồn cung cấp phù hợp cho động cơ tuyến tính.

Trong hệ truyền động điện sử dụng động cơ tuyến tính thì quá trình đảo chiều là thường xuyên xảy ra vì vậy xu hướng lựa chọn nguồn nuôi phù hợp thường đề cập đến việc lựa chọn các bộ biến tần có thể truyền công suất theo 2 chiều (biến tần 4Q).

Nhóm vấn đề thứ 5: Nâng cao chất lượng điều khiển.

Với động cơ tuyến tính luôn tồn tại hiệu ứng đầu cuối nên để nâng cao chất lượng điều khiển thì vấn đề này cần phải được ưu tiên xét đến. Có rất nhiều các công trình được công bố tập trung vào vấn đề này.

➤ Loại bỏ cơ cấu đo về tốc độ và vị trí (sensorless): Việc loại bỏ cơ cấu đo đóng vai trò hết sức quan trọng trong việc giảm giá thành hệ thống. Các công trình [31,33] đề xuất đến phương pháp loại bỏ cơ cấu đo bằng cách xây dựng thuật toán nhận dạng cực từ và đưa mô hình đầu cuối vào cấu trúc điều khiển động cơ.

➤ Theo các tài liệu [11,12,16,20,24,27,30] hiệu ứng đầu cuối trong động cơ tuyến tính được tiếp cận với góc độ mô hình mạch từ tương đương. Tài liệu [16,27] đề xuất phương pháp mô hình hóa hiệu ứng đầu cuối dựa vào cấu trúc động cơ để đưa ra sơ đồ thay thế. Trong [12] đề xuất phương án điều khiển trực tiếp momen DTC với mô hình có xét đến hiệu ứng đầu cuối. Theo [20] đề xuất phương án kết hợp với việc mô tả hiệu ứng đầu cuối kết hợp với sensor tốc độ để ứng dụng điều khiển động cơ bám với tốc độ đặt. Trong tài liệu [24] việc sử dụng bộ điều khiển PI ở mạch vòng dòng điện kết hợp với mô hình hiệu ứng đầu cuối tạo ra giá trị dòng điện tạo ra lực đẩy. Trong [30] đề xuất sử dụng bộ điều khiển trượt điều khiển gián tiếp từ thông Rotor (IFOC).

➤ Theo các tài liệu [13,14,26,36,38,40,44] sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn để mô hình hóa hiệu ứng đầu cuối xảy ra trong động cơ tuyến tính. Trong [13,14] ngoài việc mô hình hóa hiệu ứng đầu cuối còn đề xuất đến việc mô hình hóa lực cogging xảy ra trong động cơ (lực gây ra sự nhấp nhô momen không phụ thuộc vào thành phần dòng tạo ra lực đẩy mà chỉ phụ thuộc vào từ thông phân bố tại khe hở không khí). Trong [26] xây dựng mối quan hệ giữa hiệu ứng đầu cuối và khoảng cách khe hở không khí sử dụng FEM. Còn trong [36,44] đưa ra phương pháp mô hình hóa hiệu ứng đầu cuối và so sánh mô hình hiệu ứng đầu cuối khi mô hình hóa bằng mạch từ tương đương và FEM.

➤ Theo [17] tác giả đã đề xuất đến phương pháp sử dụng giải thuật di truyền kết hợp với FEM để tối ưu hóa các thông số động cơ về lực đẩy.

➤ Nhóm các phương pháp điều khiển phi tuyến [15,40,28]. Trong tài liệu [15,29,40] đề xuất phương án sử dụng bộ điều khiển backstepping và backstepping thích nghi dùng để kiểm soát lực đẩy được tạo ra. Trong [28] xây dựng cấu trúc phản

hồi trạng thái để kiểm soát vận tốc nhưng không đáp ứng được ở vùng vận tốc lớn. Bộ điều khiển trượt, trượt thích nghi kiểm soát vận tốc được đề xuất trong các tài liệu [21,41].

Thứ 6: Trong tài liệu [18] đề xuất đến một phương pháp không cần nhận dạng hiệu ứng đầu cuối sử dụng bộ điều khiển bền vững thích nghi bù bất định hiệu ứng đầu cuối, tuy nhiên trong mô hình vẫn tồn tại cảm biến đo vị trí.

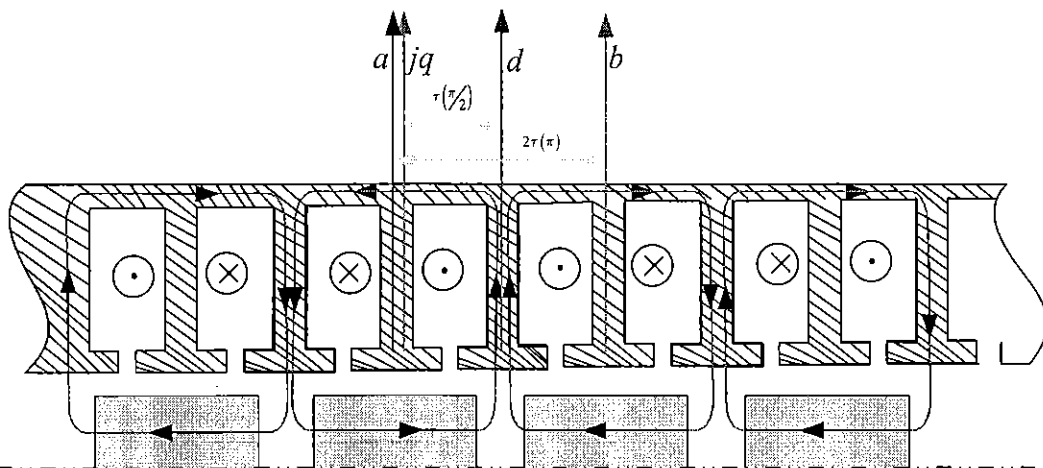
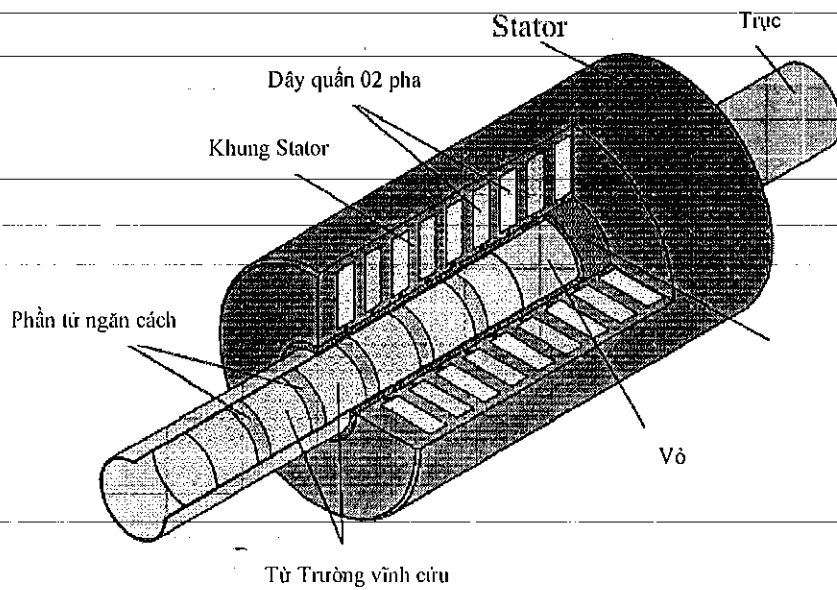
Kết luận:

Trong nội dung phần này đi phân tích tình hình nghiên cứu động cơ tuyến tính, các vấn đề liên quan đến mô hình và các phương pháp điều khiển truyền động tuyến tính. Điều đó tạo thuận lợi cho việc lựa chọn các phương pháp điều khiển áp dụng cho đối tượng động cơ tuyến tính Polysolenoid được đề cập đến ở phần sau.

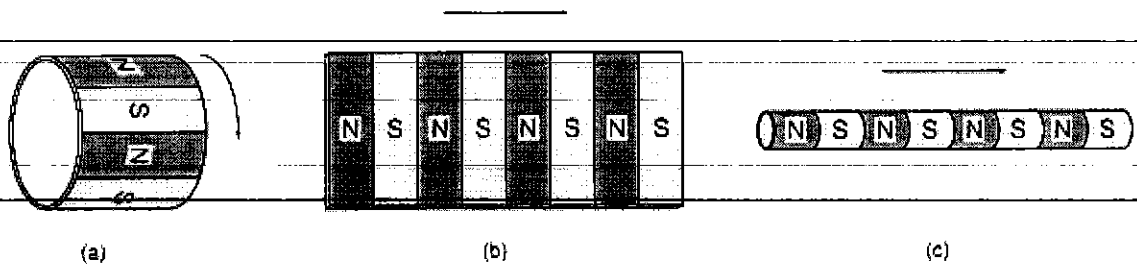
PHẦN 3: ĐỘNG CƠ TUYẾN TÍNH KÍCH THÍCH VĨNH CỬU DẠNG POLYSOLENOID ĐIỀU KHIỂN CHO TRUYỀN ĐỘNG DẠNG POLYSOLENOID.

3.1 Động cơ tuyến tính kích thích vĩnh cửu dạng Polysolenoid

Động cơ tuyến tính kích thích vĩnh cửu dạng Polysolenoid thuộc nhóm động cơ đồng bộ kích thích vĩnh cửu dạng Stator ngắn và có cấu tạo hình ống.



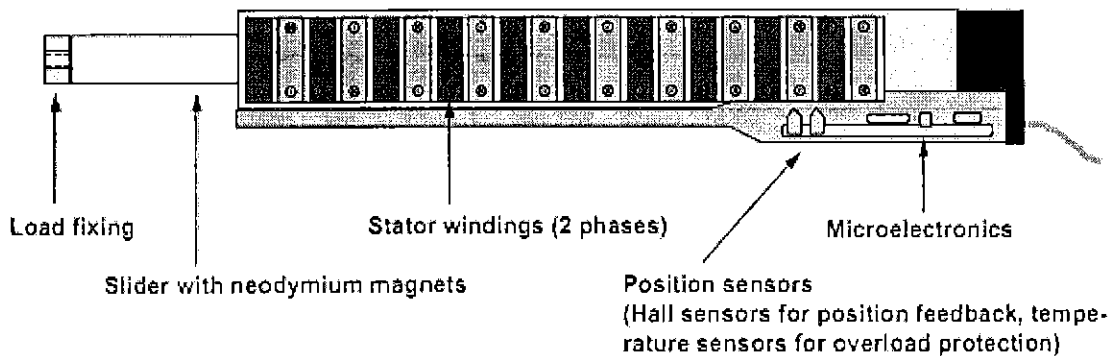
Hình 15. Cấu tạo của động cơ Polysolenoid



Hình 16. Rotor của động cơ Polysolenoid

- (a) Rotor động cơ quay
- (b) Rotor được cắt và trải ra từ (a)
- (c) Rotor được cuộn lại từ (b)

Khi cho dòng điện xoay chiều vào dây quấn sơ cấp làm xuất hiện từ trường chạy trong khe hở giữa phần sơ cấp và phần thứ cấp. Từ trường này quét qua các thanh dẫn của phần thứ cấp làm xuất hiện trong chúng sức điện động cảm ứng. Do dây quấn thứ cấp ngắn mạch nên sinh ra dòng điện ứng. Từ trường chạy tác dụng với dòng điện phần ứng sinh ra lực điện từ có xu hướng kéo phần thứ cấp chạy cùng chiều từ trường. Vì thứ cấp cố định nên tạo ra phản lực có tác dụng đẩy phần sơ cấp chạy theo chiều ngược với từ trường.



Hình 17. Sơ đồ cấu tạo bên trong DCTT ĐBKTV C Polysolenoid

Điểm khác biệt của động cơ kích thích vĩnh cửu Polysenoid so với các động cơ hình ống tương ứng trong nhóm động cơ hình ống Stator ngắn nằm ở cấu trúc bố trí các cuộn dây trên phía Stator, cụ thể ở đây trên Stator được bố trí hai cuộn dây .

3.2 Điều khiển truyền động tuyến tính dạng Polysolenoid

Cùng nằm trong nhóm đối tượng động cơ đồng bộ kích thích vĩnh cửu dạng stator ngắn nhưng đối tượng được tập trung nghiên cứu nhiều trong thời gian vừa qua tập trung vào nghiên cứu cho đối tượng động cơ có kết cấu phẳng. Với nhóm động cơ hình ống chưa nhận được sự quan tâm nhiều, cho đến thời gian gần đây động cơ tuyến tính hình ống đã được phát triển dưới dạng sản phẩm thương mại mà đi đầu là hãng Linmot đã cho ra đời một họ động cơ tuyến tính hình ống. Điều này đã thúc đẩy nhiều hơn các nghiên cứu để nâng cao chất lượng điều khiển cho nhóm động cơ này.

Khái quát về tình hình nghiên cứu về điều khiển truyền động tuyến tính dạng Polysolenoid ở trong nước và trên thế giới.

3.2.1 Tình hình nghiên cứu trong nước:

Với nguồn tham khảo là các bài báo và luận văn được lưu trữ tại thư viện quốc gia Việt Nam thì chưa có công trình nào nghiên cứu về điều khiển truyền động tuyến tính dạng Polysolenoid.

3.2.2 Tình hình nghiên cứu trên thế giới:

Các nghiên cứu trên thế giới với đối tượng động cơ tuyến tính hình ống dạng Stator ngắn tập trung vào một số nhóm vấn đề như sau:

Nhóm vấn đề thứ nhất: Mô hình hóa thiết kế động cơ [51,52,60] trong đó [51] đề xuất thiết kế động cơ hình ống 2 pha nhưng phần chuyển động ở đây là nam châm vĩnh cửu, [52] thiết kế động cơ hình ống 5 pha trong khi [60] đưa ra quy trình thiết kế động cơ hình ống sử dụng giải thuật di truyền và phương pháp phần tử hữu hạn.

Nhóm vấn đề thứ hai: Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích quá trình điện từ xảy ra trong động cơ tuyến tính hình ống [55,56,57,59]. Trong đó [55,56,57] phân tích từ trường, lực cogging và lực chốt chặn tồn tại trong động cơ tuyến tính hình ống ba pha, [59] phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến lực đẩy của động cơ.

Nhóm vấn đề thứ ba: Thiết kế cấu trúc điều khiển cho động cơ tuyến tính hình ống ba pha [53,54], trong tài liệu [54] đã đưa ra phương pháp thiết kế bộ điều khiển sử dụng tiêu chuẩn Lyapunov dựa vào sai lệch vận tốc so với giá trị đặt. Tài liệu [53] đề xuất sử dụng bộ điều khiển bền vững H_∞ để kiểm soát vận tốc kết hợp với một thành phần mạng Noron bù thành phần suy giảm từ thông. Trong tất cả các tài liệu trên đều chưa đề cập đến hiệu ứng đầu cuối.

Nhóm vấn đề thứ tư: Trong tài liệu [58] đã đề xuất phương pháp mô tả hiệu ứng đầu cuối của động cơ tuyến tính hình ống ba pha sử dụng mô hình mạch từ tương đương.

Kết luận: Trong các công trình đã được công bố tập trung vào hai hướng chính.

Hướng thứ nhất: Tập trung vào việc nghiên cứu hiệu ứng đầu với hai hướng tiếp cận là mô tả dưới dạng mạch từ tương đương và sử dụng FEM. Trong hai phương pháp trên phương pháp sử dụng FEM mô tả hiệu ứng đầu cuối mang tính trực quan hơn. Tuy nhiên khi sử dụng FEM phải có được các thông số chính xác của động cơ.

Hướng thứ hai: Nghiên cứu cấu trúc điều khiển bù bất định hiệu ứng đầu cuối tuy nhiên trong hệ thống tồn tại cảm biến đo vị trí.

Kết luận:

Trong nội dung phần này đi phân tích tình hình nghiên cứu động cơ tuyến tính Polysolenoid, các vấn đề liên quan đến mô hình và các phương pháp điều khiển truyền động tuyến tính dạng Polysolenoid. Điều đó tạo thuận lợi cho việc lựa chọn đề xuất các phương pháp nghiên cứu tiếp theo cho bài toán điều khiển truyền động tuyến tính dạng Polysolenoid.

PHẦN 4 : ĐỀ XUẤT VỀ PHƯƠNG ÁN NGHIÊN CỨU TIẾP THEO CHO ĐỘNG CƠ POLYSOLENOID.

Trong các phần đã trình bày ở trên đã cho ta nhìn nhận một cách tổng quát về các vấn đề tồn tại của động cơ tuyến tính nói chung và động cơ Polysolenoid nói riêng. Nội dung của luận án sẽ tập trung nghiên cứu đối tượng động cơ Polysolenoid theo hướng nâng cao chất lượng điều khiển khi xét đến hiệu ứng đầu cuối và được thể hiện theo những nội dung sau.

Nội dung 1: Mô hình hóa động cơ Polysolenoid khi không xét đến hiệu ứng đầu cuối. Mô hình hóa động cơ Polysolenoid sử dụng phương pháp không gian trạng thái. Đề xuất phương án chuyển hệ tọa độ mô tả toán học của mô hình để sử dụng được cấu trúc tách kênh trực tiếp trong cấu trúc điều khiển.

Nội dung 2: Tiếp tục tìm các phương pháp để mô hình hóa hiệu ứng đầu cuối của động cơ Polysolenoid (FEM, ALSYS,...). Kết quả thu được sẽ được sử dụng dưới dạng bộ số liệu bổ xung vào cấu trúc điều khiển.

Nội dung 3: Đề xuất phương pháp điều khiển phi tuyến cho cấu trúc điều khiển tách kênh trực tiếp có xét đến hiệu ứng đầu cuối của động cơ Polysolenoid.

Nội dung 4: Đề xuất cấu trúc và xây dựng bàn thí nghiệm sử dụng để kiểm chứng kết quả nghiên cứu lý thuyết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Quang N. P., Dittrich A: *Vector Control of Three – Phase AC Machine*. Springer,2008.
- [2] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Bronislaw Tomczuk *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems* 2nd Edition. CRC press, 2011.
- [3] I. Boldea, Syed A. Nasar, *Linear Electric actuator and generators*, Cambridge university press, 1997.
- [4] Rolf Hellinger and Peter Mnich, Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook, proceedings of the IEEE | vol. 97, no. 11, November 2009
- [5] Daniel Ausderau, *Polysolenoid – Linearantrieb mit genutetem Stator*; Doktor der Technischen wissenschaften der Eidgenossischen Technischen Hochschule Zurich. PhD Thesis.
- [6] Jeong-hyoun Sung and Kwanghee Nam, *A New Approach to Vector Control for a Linear Induction Motor Considering End Effects*, 1999 IEEE
- [7] Jawad Faiz, Senior Member, IEEE, and H. Jafari, *Accurate Modeling of Single-Sided Linear Induction Motor Considers End Effect and Equivalent Thickness*, IEEE transactions on magnetics, vol. 36, no. 5, september 2000.
- [8] S. Vaez-Zadeh, M. R. Satvati, *Vector Control of Linear Induction Motors with End Effect Compensation*.
- [9] A. H. Selçuk and Hasan Kürüm, *Investigation of End Effects in Linear Induction Motors by Using the Finite-Element Method*, IEEE transactions on magnetics, vol. 44, no. 7, july 2008.
- [10] R. Rinkevičienė, A. Smilgevičius, Linear Induction Motor at Present Time, *ISSN 1392 – 1215, electronics and electrical engineering*, 2007. no. 6(78).

[11] Brahim bessaihl, Abdelkrim Boucheta, Speed Control of Linear Induction Motor considering End-Effect Compensation using Rotor time constant estimation, 2012- 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices.

[12] M. Ali Usta , Omur Akyazi, A. Sefa Akpinar, Simulation of Direct Thrust Control for Linear Induction Motor Including End-Effect.

[13] Min-Jae Kim*, Jaewon Lim*, Woo-Gyong Yim* and Hyun-Kyo Jung, Phase Current Magnitude Variation Method to Reduce End-Effect Force of PM Linear Synchronous Motor, *Journal of Electrical Engineering & Technology* Vol. 6, No. 6, pp. 793~798, 2011.

[14] Hyung-Woo Lee†, Chan-Bae Park* and Byung-Song Lee*, Phase Current Magnitude Variation Method to Reduce End-Effect Force of PM Linear Synchronous Motor, *Journal of Electrical Engineering & Technology* Vol. 6, No. 1, pp. 81~85, 2011.

[15] Chin-I Huang, *Student Member, IEEE*, and Li-Chen Fu, *Fellow, IEEE*, adaptive approach to motion controller of linear induction motor with friction compensation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, August 2007.

[16] Y. Nozaki, T. Yamaguchi, and T. Koseki, Practical Equivalent Circuit Model of Linear Induction Motors for Urban Transportation System Depending on Secondary Speed Based on Electromagnetic Analysis.

[17] Abbas SHIRI, Abbas SHOULAIE, Multi-objective optimal design of low-speed linear induction motor using genetic algorithm, *ISSN 0033-2097*, r. 88 nr 3b/2012.

[18] Kuang-Yow Lian, Member, IEEE, Cheng-Yao Hung, Chian-Song Chiu, Member, IEEE, and Li-Chen Fu, Fellow, IEEE, *Robust Adaptive Control of Linear Induction Motors With Unknown End-Effect and Secondary Resistance*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, June 2008

[19] Jae -Uk Kim, Sung Yoon Jung, PMSM Angel Detection Based on the EdgLe Field Measurement by Hall sensor.

[20] Jeong-hyoun Sung and Kwanghee Nam, A New Approach to Vector Control for a Linear Induction Motor Considering End Effects, 1999 IEEE.

[21] Ming-Shyan Wang, Ying-Shieh Kung, Cheng-Yi Chiang, and Yi-Ci Wang, Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Drive Design Based on Sliding-Mode Control and Fuzzy Deadzone Estimation, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics San Antonio, TX, USA - October 2009.

[22] Xiaozhou GUO1*, Bin ZHOU2, Jisan LIAN, A new method to reduce end effect of linear induction motor, Journal of Modern Transportation Volume 20, Number 2, June 2012, Page 88-92.

[23] J.W.Choi. W.E Yun, H.G Kim, Initial pole – position estimation off linear motor, IEEE 2005m Vol.152 .

[24] S. Vaez-Zadeh, M. R. Satvati, Vector Control of Linear Induction Motors with End Effect Compensation.

[25] Jia Zhao*, Zhongping Yang *, Jianqiang Liu*, and Trillion Q. Zheng*, *A Novel Performance Study for Linear Induction Motors Considering End Effects*, 2008 IEEE

[26] A. H. Selçuk and Hasan Kürüm, Investigation of End Effects in Linear Induction Motors by Using the Finite-Element Method, *ieec transactions on magnetics*, vol. 44, no. 7, july 2008

[27] Jia Zhao, Zhongping Yang , Jianqiang Liu, and Trillion Q. Zheng, *A Novel Performance Study for Linear InductionMotors Considering End Effects*, 978-1-4244-1668-4/08 2008 IEEE.

[28] Gerco Otten, Theo J. A. de Vries, *Member, IEEE*, Job van Amerongen, *Member, IEEE*, Adrian M. Rankers, and Erik W. Gaal, *Member, IEEE*, Linear Motor Motion Control

Using a Learning Feedforward Controller, *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 2, no. 3, September 1997.

[29] A. Boucheta, I. K. Bousserhane, A. Hazzab, B. Mazari and M. K. Fellah, *Backstepping Control of Linear Induction Motor Considering End Effects*, 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. 2009 IEEE

[30] A. Boucheta, I. K. Bousserhane, A. Hazzab, B. Mazari and M. K. Fellah, *Linear Induction Motor Control Using Sliding Mode Considering the End Effects*, 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices.

[31] P. Giangrande, F. Cupertino, G. Pellegrino Politecnico di Bari Politecnico di Torino, *Modelling of linear motor end-effects for saliency-based sensorless control*, 978-1-4244-5287-3/10/ ©2010 IEEE.

[32] F.-J. Lin, P.-H. Shen and S.P. Hsu, *Adaptive backstepping driving mode control for linear induction motor drive*, *IEE Proc.-Elecir. Powr Appl.* Vol. 149, 2002

[33] Chin-I Huang¹ * and Li-Chen, Fu, *Adaptive Control Approach for Speed Motion-Sensorless of Linear Induction Motor Unknown Resistance and Payload*, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6-11, 2008

[34] Bijoy K. Mukherjee, A. Sengupta, S. Maiti, M. Sengupta, *design, fabrication, dsp implementation and comparison of simulated performance of a linear induction motor for p-i and h^∞ control schemes.*

[35] David C. Meeker, *Member, IEEE* and Michael J. Newman, *Member, IEEE*, *Indirect Vector Control of a Redundant Linear Induction Motor for Aircraft Launch.*

[36] Manpreet Singh Manna, S. Marwaha and Navpreet Kaur, Air Gap Field Analysis of Single Sided Linear Induction Motor with Time Harmonic Finite Element Method, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 India.

[37] R. Rinkevičienė, A. Petrovas, Dynamic Models of Controlled Linear Induction Drives, *issn 1392 - 1215 elektronika ir elektrotechnika*. 2005. nr. 5(61).

[38] Hamed hazehbahmani, *modeling and simulating of single side short stator linear induction motor with the end effect*, Journal of electrical engineering, vol. 62, NO. 5, 2011, 302–308

[39] A. Zare Bazghaleh, M. R. Naghashan, H. Mahmoudimanesh, M. R. Meshkatoddini, Effective Design Parameters on the End Effect in Single-Sided Linear Induction Motors, World Academy of Science, Engineering and Technology 64 2010.

[40] Ismail Khalil bousserhane, abdelkrim boucheta, abdeldjebar hazzab, benyounes mazari, mustepha rahli, mohammed karim fellah, adaptive backstepping controller design for linear induction motor position control, *u.p.b. sci. bull., series c*, vol. 71, iss. 3, 2009.

[41] Chin-I Huang, Student Member, ieee, and li-chen fu, fellow, ieee, *adaptive approach to motion controller of linear induction motor with friction compensation*, ieee/asme transactions on mechatronics, vol. 12, no. 4, august 2007.

[42] A. Hassanpour isfahani, b. m. ebrahimi, and h. lesani, design optimization of a low-speed single-sided linear induction motor for improved efficiency and power factor, ieee transactions on magnetics, vol. 44, no. 2, february 2008.

[43] Jun Wu, Wenwu ZHou, ZHiqiang Long & Wensen Chang, Direct Thrust Control by Direct Gap Flux Measurements for Linear Induction Motors.

[44] A. Zare Bazghaleh, M. R. Naghashan, H. Mahmoudimanesh, M. R. Meshkatoddini, Effective Design Parameters on the End Effect in Single-Sided Linear Induction Motors, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 40 2010.

[45] Kuang-Yow Lian, *Member, IEEE*, Cheng-Yao Hung, Chian-Song Chiu, *Member, IEEE*, Robust Adaptive control of linear induction motors with unknown end-effect and secondary resistance, *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 2, June 2008.

[46] Manpreet S Manna, S Marwaha, A Marwaha³ and C Vasudeva, Two Dimensional Quasi Static Magnetic Field Analysis of SLIM using Adaptive Finite Element Method, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol 2, No. 6, November 2009.

[47] A. Boucheta, I. K. Bousserhane, A. Hazzab, B. Mazariand M. K. Fellah, *Linear Induction Motor Control Using Sliding Mode Considering the End Effects*, 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices. 2009 IEEE

[48] Gerco Otten, Theo J.A. de Vries, *Member, IEEE*, Job van Amerongen, *Member, IEEE*, Adrian M. Rankers, and Erik w. gaal, *member, IEEE*, modeling and simulating of single side short stator linear induction motor with the end effect, *journal of electrical engineering*, vol. 62, no. 5, 2011, 302–308.

[49] P. Giangrande, F. Cupertino, *Modelling of linear motor end-effects for saliency based sensorless control*, 2010 IEEE

[50] Hongliang Lu, *On the Drive Control Strategy of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*, IEEE 8-10 Aug. 2011, **Page(s)**: 458 - 461

[51] A. Canova*, A. Garramone°, G. Grusso , Design and Optimisation of Two phase Tubular Permanent Magnet Linear Motors for Custom Applications.

[52] B. Tomczuk¹, G. Schröder², and A. Waindok¹, Finite-Element Analysis of the Magnetic Field and Electromechanical Parameters Calculation for a Slotted Permanent-Magnet Tubular Linear Motor, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 7, JULY 2007.

[53] Qing Hu, Jiao Wang, Dongmei Yu and Jiefan Cui, Robust H_∞ Controller of Tubular Linear Induction Motor with an Artificial Neural Network Compensator, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics August 18 - 21, 2007, Jinan, China

[54] Li Wenyong, Li Bincheng, Lyapunov Stable Control of Tubular Linear Permanent-Magnet Motor, Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics July 2 - 5, 2008, Xi'an, China

[55] First A. Liyi Li, Second B. Chengming Zhang and Third C. Baoquan Kou, Analysis and Suppression of Detent Force in Tubular Linear Electromagnetic Launcher for Space Use, 978-1-4244-1833-6/08/\$25.00 ©2008 IEEE.

[56] Ioana-Cornelia VESE, Fabrizio MARIGNETTI, Mircea M. RADULESCU, Multiphysics approach to numerical modelling and analysis of permanent-magnet tubular linear motors, Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.

[57] y. bencheikh, y. ouazir and r. ibtiouen, tubular linear induction motor analysis by using finite elements and current filament models, xix international conference on electrical machines - icem 2010, rome.

[58] Francesco Cupertino, *Member, IEEE*, Gianmario Pellegrino, *Member, IEEE*, Paolo Giangrande, *Student Member, IEEE*, and Luigi Salvatore, Sensorless Position Control of Permanent-Magnet Motors With Pulsating Current Injection and Compensation of Motor End Effects, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, may/june 2011

[59] Xiaofeng ZhOU, Xiaoning Chen, Junyi LiU, The Starting Thrust Simulation of a Tubular LinearMotor on the Base of Finite Element Analysis, 978-1-4244-6908-6/10

©2010 IEEE

[60] C. Pompermaier, F. J. H. Kalluf, M. V. Ferreira da Luz and N. Sadowski, Study and optimization of a small tubular linear motor with permanent magnet, XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome

[61] Đào Phương Nam, Nâng cao chất lượng các hệ chuyển động thẳng bằng cách sử dụng hệ truyền động động cơ tuyến tính, Luận án Tiến sỹ Tự động hóa Xí nghiệp Công nghiệp, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2012.

[62] Trương Minh Tuấn, Nghiên cứu cải thiện đặc tính lực động cơ không đồng bộ ba pha tuyến tính, Luận án Tiến sỹ Kỹ thuật điện, Bách khoa Hà Nội, 2013.



Received: 29-08-2023
Accepted: 09-10-2023

ISSN: 2583-049X

Linear Motors for Industrial Automation Applications

¹Huong TV Nguyen, ²Quang H Nguyen

¹Thai Nguyen Industry Colleges, Vietnam

²Thai Nguyen University of Technology, Vietnam

Corresponding Author: **Huong TV Nguyen**

Abstract

Linear machines rarely achieve the performance expected from their rotary equivalents in terms of power factor or efficiency. However, in several applications, this reduction in performance is more than compensated for by

convenience and robustness. This paper will analyze the applicability of linear motors in direct-translational motion-generating systems used in Industrial Automation Applications.

Keywords: Linear Motion, Linear Motor, Motion Control

1. Introduction

Linear induction motors are little more than a "cut open and rolled flat" version of rotary AC induction motors [1-10]. Today's linear motion applications are more demanding than ever before. More exact positioning, longer life, less maintenance, fewer moving parts. Motion control companies strive to meet and exceed these requirements through continual technological advancement. Advancements in linear encoder technology also allow for higher-speed operation. Today's linear encoders and other devices can meet this challenge, are less noise-susceptible, and cost less. Commutation is done electronically either by Hall-effect sensors or sinusoidal [11]. Hall-effect sensors located within theforcer are activated by the magnets on the rail. Sine commutation is accomplished using the linear encoder signals back to the controller. A common technique is using the Hall-effect initially and then switching to sinusoidal commutation. The force generated by the same size motor is more significant than brush motor technology due to improved magnet materials.

2. Industrial Applications of Linear Motor Applications

Linear induction motors consist of a moving primary (rotor in traditional rotary induction motors) that contains the motor coils and a stationary secondary (stator in standard rotary induction motors). These motors primarily include a three-phase winding, which carries the current supplied by the AC synchronous or AC vector drive. As current flows in the primary windings, it is induced to flow in the secondary windings. The interaction of the electromagnetic fields produced by the currents in the primary and secondary windings generates linear force to propel the primary.

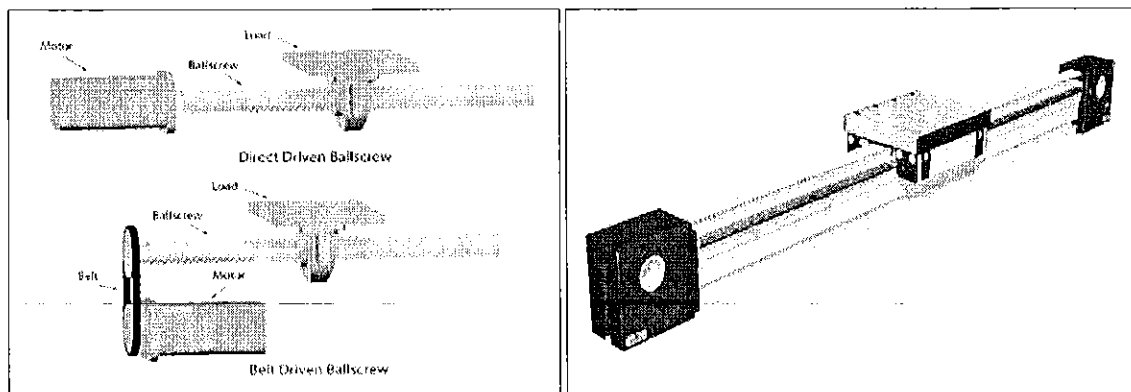


Fig 1: Characteristics of a linear motion system

In Fig.1, We can see that using linear motors makes the system compact and achieves a higher efficiency in the same limited space. Linear motors have now been used in practice in all power ranges. In the high-power range, they are in the transmission mechanism used in transport vehicles such as trains and metro. In the medium and low power range, they are applied in automatic control of CNC digital machine tools, robot arm control, lifting machines, and flexible production systems with high requirements of position accuracy, high speed, and fast impact. In the low power range, they are used in equipment such as printers, laser cutters used in surgery, etc.

Electrical linear motors produce direct linear motion without rotary components. The motor driving the system can be controlled to provide the desired velocity, acceleration, torque, and position to yield optimal performance.

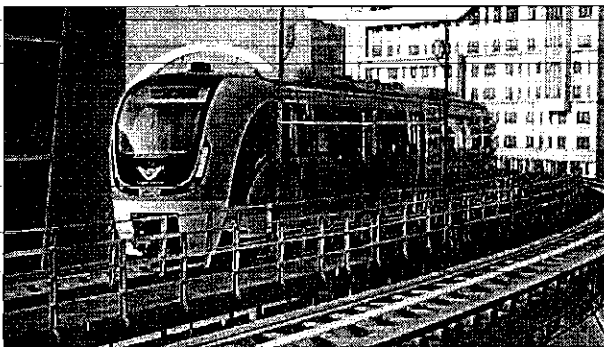


Fig 2: Korea's maglev train launches in Incheon [12]

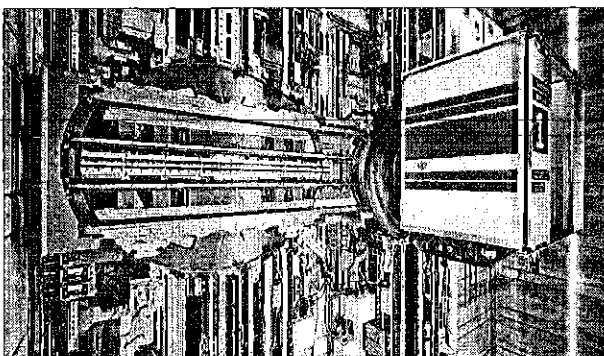
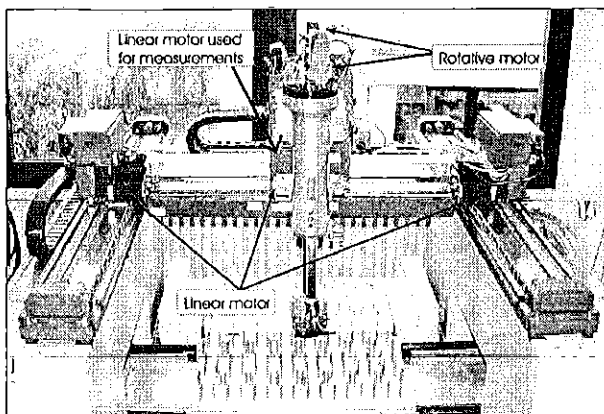
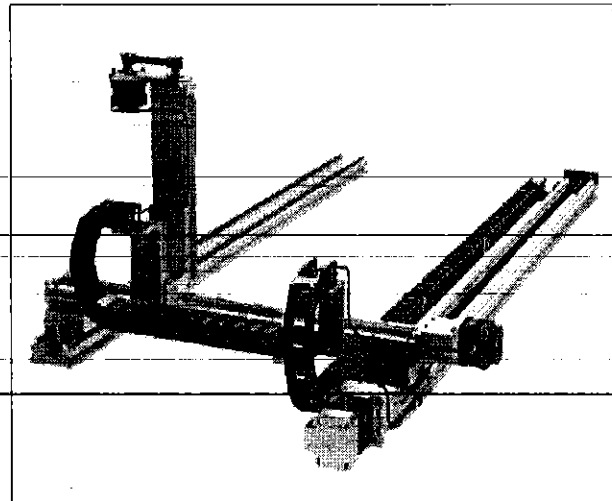


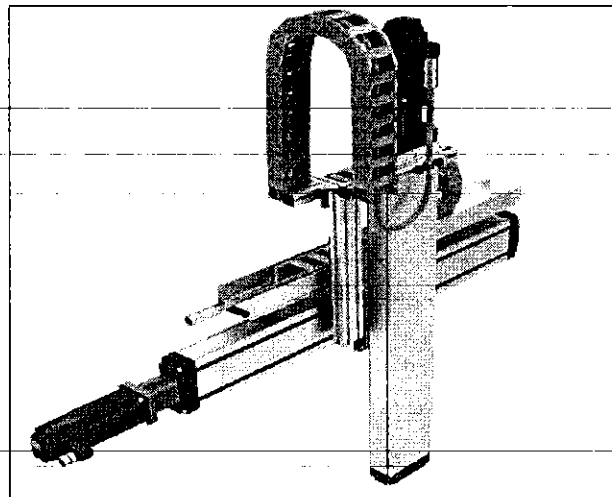
Fig 3: ThyssenKrupp's linear motor elevator capable of traveling sideways [13]



a.)



b.)



c.)

Fig 4: Application of linear motors in CNC machines

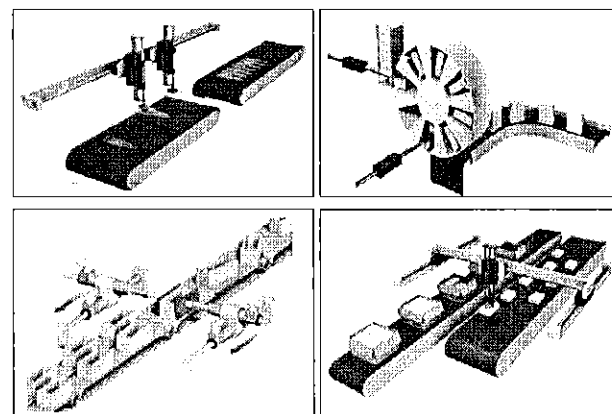


Fig 5: Application of linear motors in packaging technology [12]

Some typical linear motion applications are illustrated in Fig 2 to Fig 5. The system designer often specifies linear motion technologies when manufacturing processes require high precision, high-speed repeatability, and flexibility for CNC, robotics, and material handling applications. A basic linear

motion system integrates a power component, such as a motor, a thrust mechanism, an actuator, and a guidance infrastructure, such as a rail.

The linear motion can be selected and sized quickly and easily, thanks to predefined axis combinations. Each multi-axis system is also available as a Smart Function Kit for handling or dispensing. Preinstalled software then allows even quicker commissioning and intuitive programming. This significantly reduces the engineering time.

3. Conclusion

This analysis of Linear motor applications in motion systems has been described in this work. Linear actuators are essential for automated motion control of pick-and-place applications, industrial-grade machinery, and consumer-grade equipment. The most important factors to consider when sizing, selecting, installing, and operating a linear system are the loads and moments, speed, acceleration, required accuracy, and rigidity. Accuracy is how closely the system moves compared to a commanded position. Rigidity is essential because the system must be stiff or rigid enough to prevent deformation or unintentional movement. Typically, linear motors exhibit the best accuracy but have higher initial costs. Overall, linear motors are the best choice if you are pursuing both acceleration and accuracy in one single system, which is hard to find in other systems.

4. Author Contributions

Huong T.V. Nguyen devised the project's main conceptual ideas and wrote the manuscript. Quang H. Nguyen contributed to identifying appropriate structures to express ideas. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

5. Acknowledgement

The authors thank the Thai Nguyen University of Technology for supporting this work.

6. References

1. Boldea I. Linear electric machines, drives, and MAGLEVs handbook. CRC press, 2017.
2. Hellinger R, Mnich P. Linear motor-powered transportation: History, present status, and future outlook. Proceedings of the IEEE. 2009; 97(11):1892-1900.
3. Bianchi N. Analytical field computation of a tubular permanent-magnet linear motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2000; 36(5):3798-3801.
4. Toliyat HA, Kliman GB. (Eds.). Handbook of electric motors. CRC press. 2018; 120.
5. McLean GW. Review of recent progress in linear motors. In IEE Proceedings B (Electric Power Applications). IET Digital Library. 1988; 135(6):380-416.
6. Vyshnevsky O, Kovalev S, Wischnewskiy W. A novel, single-mode piezoceramic plate actuator for ultrasonic linear motors. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2005; 52(11):2047-2053.
7. Gieras JF, Piech ZJ, Tomczuk B. Linear synchronous motors: Transportation and automation systems. CRC press, 2016.
8. Bayram D, Ustun O. An approach to optimal design of double-sided coreless linear motor. In 2017 18th

International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Book of Abstracts. IEEE, 2017, 1-2.

9. Laithwaite E. The Development of the Linear Induction Motor. Transactions of the Newcomen Society. 1995; 67(1):185-205.
10. Xifu C, Weiqing H. A new type of non-resonant linear motor with piezoelectric stacks. In 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1995.
11. <https://linmot.com>
12. <https://www.korea.net/NewsFocus/Society/view?articleId=132454>
13. <https://www.dezeen.com/2017/07/12/thyssenkrupp-unveils-worlds-first-rope-less-sideways-moving-elevator-system-multi/#:~:text=Called%20Multi%2C%20the%20ground%20breaking%20system,well%20as%20up%20and%20down>