

УДК 621.313

UDC 621.313

**ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ ЛИНЕЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЯГОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ТРАКТОРОВ**

**BRAKE MODES OF LINEAR MOTORS FOR TRACTION TESTS OF TRACTORS**

Давыдов Сергей Кеоркович  
доцент  
*Армавирский механико-технологический институт (филиал) ФГБОУ КубГТУ, Армавир, Россия*

Davydov Sergey Keorkovich  
associate professor  
*Armavir Institute of Mechanics and Technology (branch) of FSBEI HPE Kuban State Technological University, Armavir, Russia*

В статье рассматривается вопрос применения линейных двигателей различных видов конструкций для испытания тракторов в лабораторных условиях. Обсуждаются наиболее важные результаты и технологии моделирования

The article considers the question of the use of linear motors of different types of constructions for the tests of tractors in laboratory conditions. The most important results and technologies of modeling are discussed

Ключевые слова: ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ, ЭКСПЕРИМЕНТ, МОДЕЛЬ, ТЯГОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Keywords: LINEAR ELECTRIC MOTOR, EXPERIMENT, MODEL, TRACTIV RESISTANCE, MAGNETIC FIELD

Целью работы является разработка устройства, обеспечивающего воспроизведение по заданной программе на крюке и на несущей системе трактора широкого диапазона крюковых усилий и нагрузок, эквивалентных получаемым в обычных хозяйственных условиях.

Основными факторами, воздействующими на трактор при работе его в реальных условиях эксплуатации, является тяговое сопротивление агрегатируемых с ним сельскохозяйственных машин и неровности фона, на котором производится та или иная операция. Поэтому испытываемый трактор движется по специальному полигону, на беговой дорожке могут устанавливаться различного типа препятствия, моделирующие неровности почвенного фона. Трактор движется по полигону с устройством, моделирующим постоянную составляющую крюкового усилия. Программа нагрузки по крюковому усилию задается специальной аппаратурой.

Устройства для тяговых испытаний тракторов должны позволять одновременно производить испытания тракторов марок различного класса.

Параметры крюковых усилий в зависимости от мощности трактора приведены в таблице 1.

Вес индукционного устройства, задающего усилия на крюке трактора, должен соответствовать весу агрегатируемой с трактором сельскохозяйственной машины. Это требование обусловлено необходимостью создания идентичных условий работы трактора в динамических режимах.

Таблица 1 - Параметры крюковых усилий трактора

| Наименование параметров            | Мощность трактора л. с. |         |          |           |
|------------------------------------|-------------------------|---------|----------|-----------|
|                                    | 50-60                   | 100-130 | 200-250  | 400-500   |
| Тяговое усилие, КГС                | 1500-3000               | 4000    | 5000     | 10000     |
| Минимальная скорость, км/ч         | 4                       | 7       | 7        | 7         |
| Амплитуда случайных колебаний, КГС | 50-500                  | 50-1000 | 100-1600 | 1600-3000 |
| Частота случайных колебаний, р/с   | 2-60                    | 2-60    | 2-60     | 2-60      |

## 1. Аналитический обзор электродвигателей с поступательным движением

### 1.1 Линейные асинхронные двигатели

Если обычный круглый статор асинхронного электродвигателя разрезать по оси и выпрямить, то получится статор линейного двигателя (рисунок 1).

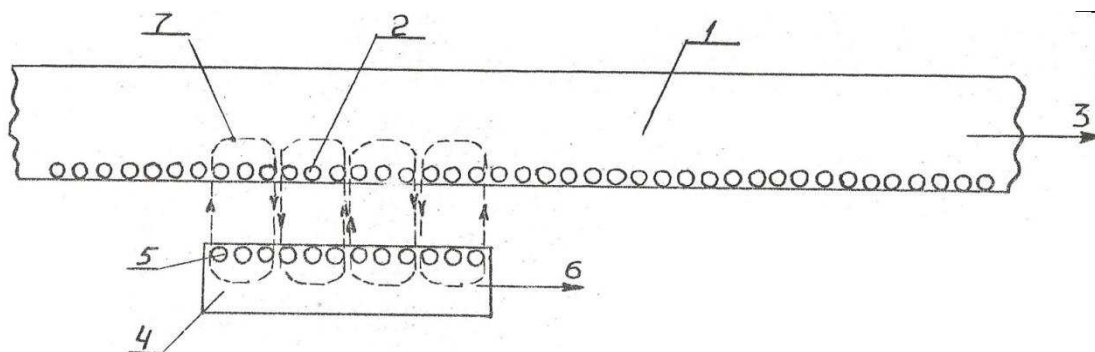


Рисунок 1 Асинхронный линейный двигатель

Трехфазная обмотка 2 статора 1 создаёт в воздушном зазоре в пределах сердечника статора бегущее магнитное поле 3. Взаимодействие силовых линий 7 этого поля с токами, наводимыми в обмотке 5 бегунка 4 приводит к движению бегунка в направлении 6.

Принцип действия линейных асинхронных машин одинаков с принципом вращения асинхронных машин.

Линейные АД практически не ограничены длиной перемещения. Хорошо зарекомендовали себя в устройствах внутрицехового транспорта, где они позволили повысить общий режим механизации и автоматизации [8].

Предусматривается использование ЛАД в электроприводах большей протяженности, которые обеспечат перемещение груза со скоростью 10 -15 м/с.

Однако затруднительность независимого от усилия регулирования скорости является недостатком ЛАД. Наиболее эффективно, хотя и дорого, частотное регулирование, менее перспективны изменение числа полюсов и варьирование скольжением. Наиболее очевидно применение ЛАД для скорости 3-10 м/с, которые условно называется средними. Трудности начинаются при попытке получить скорость ниже 3 м/с при стандартной

частоте. Известен из мировой практики конструкции серийных ЛАД имеют нижнюю синхронную скорость 3м/с.

## 1.2 Линейные двигатели постоянного тока

В тех случаях, когда необходимо, чтобы перемещение производилось с определённым законом изменения скорости или при низких скоростях, более надёжным и эффективным является линейный двигатель постоянного тока (ЛДПТ).

Представляет практический интерес ЛДПТ, где неподвижным является статор 1 (рисунок 2), в пазах которого размещается распределенная обмотка 2, получающая питание от источника постоянного тока. Подвижная часть содержит двухполюсной электромагнит 3, обмотка которого получает питание от щеток, скользящих по линейному коллектору 4.

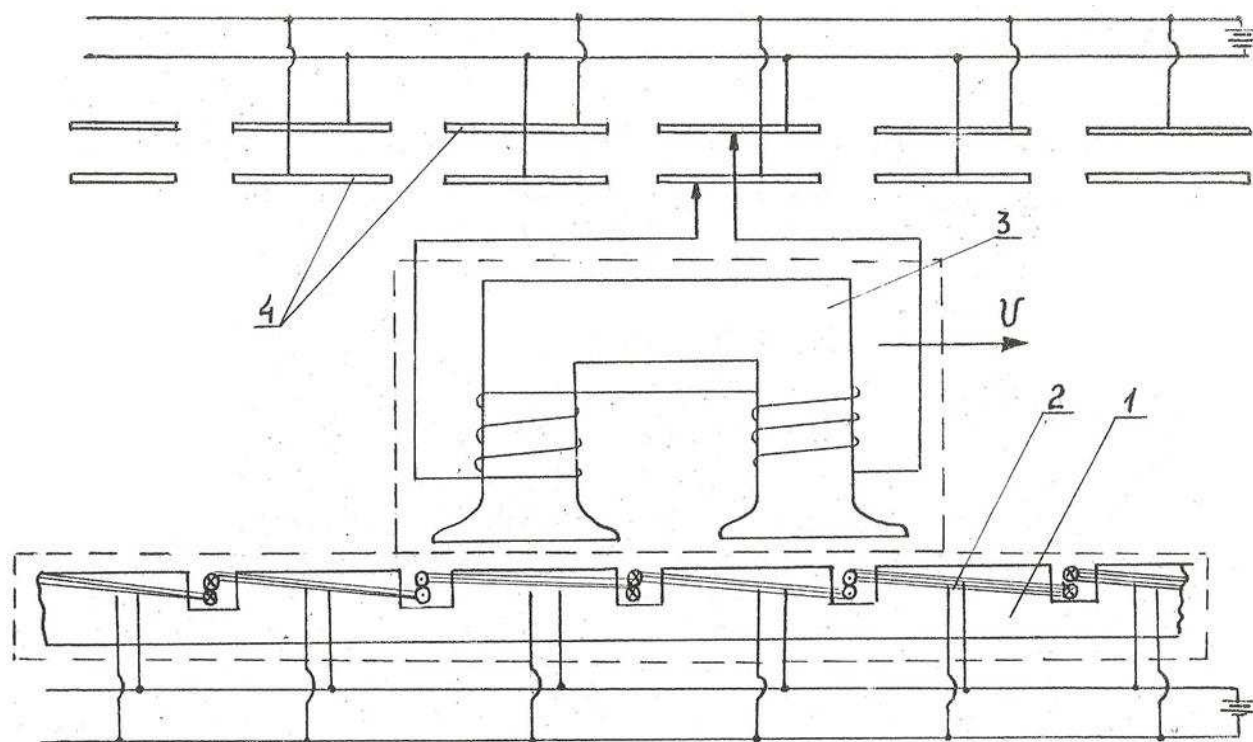


Рисунок 2 Линейный двигатель постоянного тока с линейным коллектором

В линейных двигателях постоянного тока принципиальные конструктивные ограничения возникают в связи с трудностями изготовления линейного коллектора. Именно эти затруднения приводят к тому, что линейные двигатели постоянного тока чаще всего могут быть только короткоходовыми и, именно, поэтому разрабатываются бесколекторные варианты [9].

В [9] описан ЛДПТ возвратно-поступательного движения (рисунок 3).

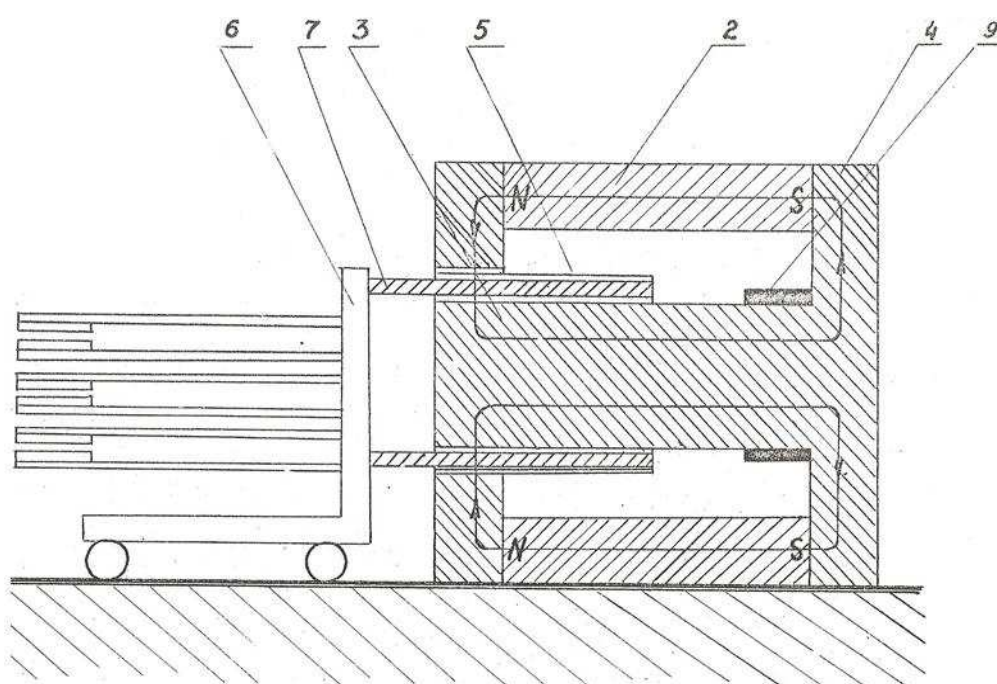


Рисунок 3 Линейный двигатель постоянного тока для возвратно-поступательного движения

Двигатель предназначен для перемещения тележки с заданной скоростью на прямолинейном участке ограниченной длины. Он имеет магнитопровод из двух магнитов 2, укрепленных внутри ярма 4. В одной из торцовых частей ярма имеется сквозная кольцевая прорезь, концентричная со стержнем 3. В прорези свободно поступательно перемещается силовая катушка 5, задающая скорость и направление перемещения тележки 6.

Большой интерес представляет машина постоянного тока со сверхпроводниковой обмоткой якоря. В этой машине коммутация тока происходит непосредственно в обмотке якоря (рисунок 4). Это позволяет исключить коллектор, а значит, упростить конструкцию машины и повысить её эксплуатационную надежность. Подвижным может быть как якорь с обмотками 2,3,4,5, так и статор с полюсами 8,9. Катушки 2,3 и 4,5 объединены в катушечные группы. Причем активные стороны катушек внутри группы расположены друг против друга. Катушки включены параллельно на шину сети. Якорная обмотка помещается в криостат.

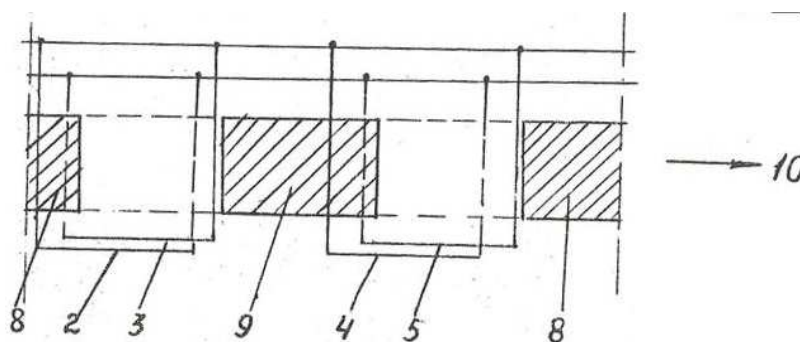


Рисунок 4 Машина постоянного тока со сверхпроводниковой обмоткой

Каждая катушка имеет коммутационную сторону, обозначенную пунктиром и выполненную из сверхпроводящего материала. Полюсы 8 и 9 имеют одинаковую полярность и перемещаются относительно обмотки в направлении стрелки 10. При положении коммутируемой стороны катушки за пределами полюсов она обладает сверхпроводящими свойствами и по катушки над полюсом она представляет большое сопротивление для тока. В этот момент по катушке должен протекать ток, который называется током потерь и направлен встречно рабочему току. Размеры и расположение катушек должны только по одной стороне каждой катушки. Таким образом, рабочий ток протекает всегда только в катушках по числу равных половине всех катушек.

К недостаткам линейных двигателей постоянного тока относится: сложность выполнения линейного коллектора, большие магнитные тяжения и другие. Большие магнитные тяжения вызывают большие силы трения [9].

## 2. Обоснование выбранного направления работы

### 2.1 Тормозные режимы работы линейных двигателей

Индукционные устройства для тяговых испытаний тракторов должны выполнять роль тормоза. Следовательно, использование линейных двигателей в качестве таковых предопределяет их работу в тормозных режимах.

У ЛАД возможно торможение в режиме противовключения, в генераторном режиме и в режиме динамического торможения [8].

Аналогичные режимы торможения можно применить и для линейных двигателей постоянного тока.

Рассмотрим возможность использования в качестве тормоза линейного двигателя.

Техническим заданием предусматривается минимальная скорость работы трактора 4 км/час или это соответствует 1,1 м/с. Если принять длину статора единичного ЛАД, к примеру, 5 метров, то на основе формулы

$$v = L \cdot n_1$$

где  $v$  - линейная скорость, м/с

$L$  - длина ЛАД, м

$n_1$  - скорость вращения, об/с

Находим:

$$n_1 = \frac{v}{L} = \frac{1.1}{5} = 0.22 \frac{\text{об}}{\text{с}}$$

Известно, что синхронная скорость вращения асинхронного двигателя определяется

$$n_1 = \frac{f_1 \text{ об}}{p \text{ с}}$$

где  $f_1$  - частота сети, Гц

$p$  - число пар полюсов машины.

Находим

$$p = \frac{f_1}{n_1} = \frac{50}{0.22} = 230$$

Длина полюсного шага машины определяется

$$T = \frac{L}{2p} = \frac{5}{2 * 230} = 1.09 * 10^{-2}, \text{ м}$$

Выполнить асинхронную машину с таким полюсным шагом невозможно. Следовательно, невозможно и применение ЛАД с промышленной частотой 50 Гц в качестве тормозного устройства тракторов.

Рассмотрим возможность использования в качестве тормоза линейного двигателя постоянного тока.

Линейная скорость ЛДПТ определяется по следующей формуле:

$$v = \frac{U - I_a * R_a}{2\pi k \Phi} * L$$

где  $U$  - напряжение якорной обмотки, В

$I_a$  - ток обмотки якоря, А

$R_a$  - сопротивление, Ом

$k$  - конструктивный коэффициент машины,

$\Phi$  - магнитный поток машины, Вб



таким образом, скорость ЛДПТ зависит от сети, тока якоря, сопротивления якорной обмотки и тока возбуждения, которые практически могут быть определены расчетом в соответствии с требуемой скоростью.

В режиме генераторного торможения будем иметь

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a}$$

где:  $E_a$  - ЭДС, наводимая в обмотке якоря, В

$$E_a = \frac{2\pi k\phi}{L}$$

Сила торможения определяется

$$F_T = 2\pi k \frac{\phi * I_a}{L}$$

В режиме противовключения будем иметь

$$I_a = \frac{E_a + U}{R_a}$$

В режиме динамического торможения имеем

$$I_a = \frac{E_a}{R_a}$$

Как видно из [4,9] наибольшая сила торможения имеет место в режиме противовключения.

Режим противовключения сопровождается большими токами, превышающими ток которого замыкания и для длительного режима работы рекомендован быть не может. Если подставить выражения, то получим формулу для определения силы торможения в динамическом режиме

$$F_T = 4\pi^2 k^2 \phi^2 \frac{v}{R_a * L^2}$$

Как видно, сила торможения ЛДПТ в динамическом режиме не зависит от тока якоря, а пропорциональна скорости перемещения и квадрату магнитного потока

Известно, что режим динамического двигателя постоянного тока происходит при отключении якоря от сети и замыкании его на <http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/96.pdf>

сопротивление. Обмотка возбуждения остаётся присоединённой к сети. Изменяя ток возбуждения, будем изменять магнитный поток, который пропорционален магнитной индукции машины в воздушном зазоре

$$\phi = B_{\delta}$$

Таким образом, магнитный поток можно изменять не только изменением тока возбуждения, но и изменением величины воздушного зазора. С точки зрения как регулировочных свойств, так и конструктивного выполнения, ЛДПТ могут быть использованы в качестве тормозных устройств для тракторов.

В лабораторных условиях была изготовлена модель ЛДПТ с коллектором (рисунок 5).

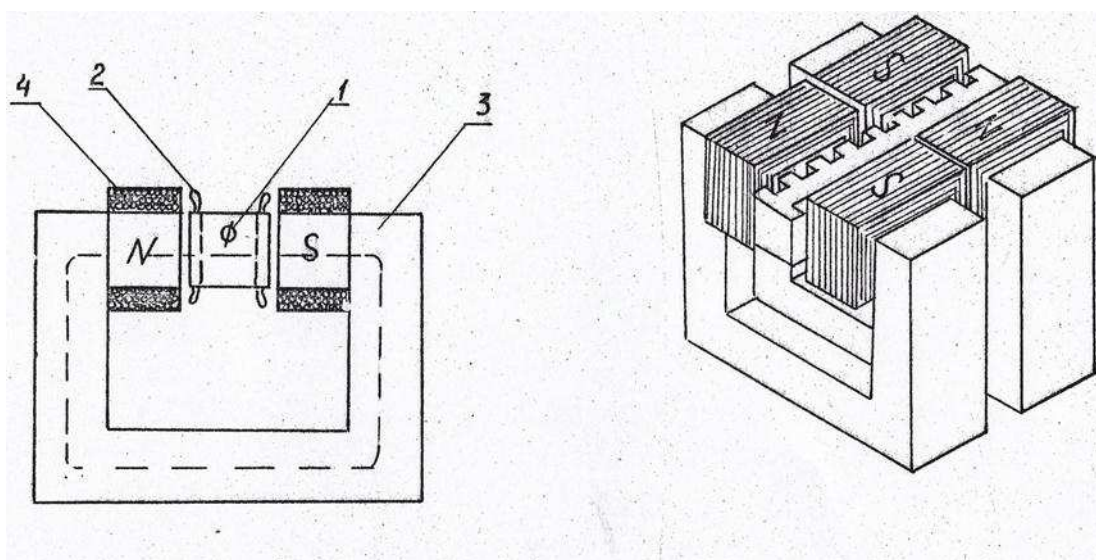


Рисунок 5 Модель линейного двигателя постоянного тока с подвижным якорем

Подвижным является якорь 1 с обмоткой 2, неподвижным – статор 3, с обмоткой возбуждения и полюсами 4.

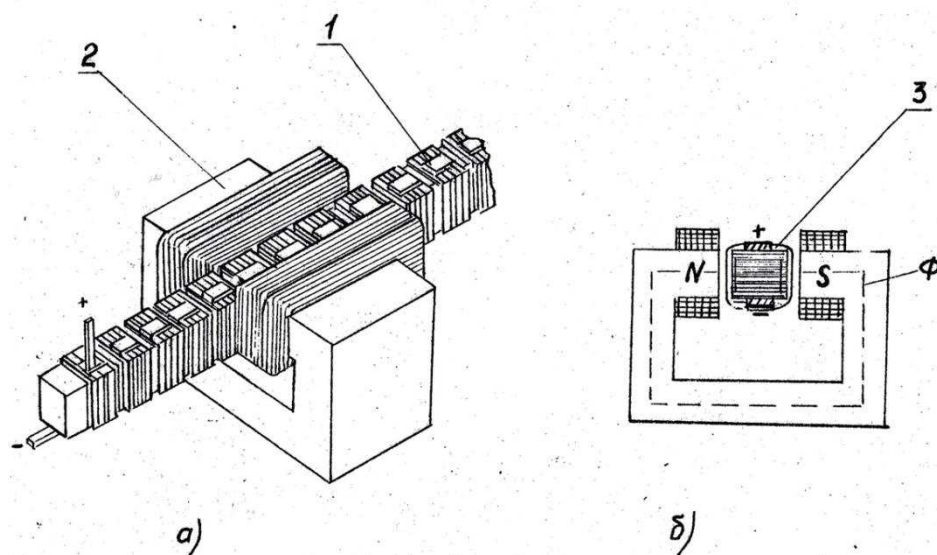


Рисунок 6 Схема якорной обмотки линейного двигателя

а) с коллективом коммутатором

б) с тиристорным коммутатором

На рисунке 6 предоставлена схема якорной обмотки с коллекторным коммутатором и с тиристорным коммутатором коллектор и полупроводник коммутатор движутся вместе с якорем, щетки неподвижны и подключены к напряжению сети.

Недостатками такого двигателя являются

а) большие габариты, вес железа и меди, укладываемой неподвижной части в полотне дороги;

б) сложное устройство как коллекторного, так и тиристорного коммутатора;

в) большое магнитное тяжения, требующее создания абсолютно жесткой конструкции полюсов и якоря и применения центрирующих дисков и роликов;

г) вдоль линии движения ЛДПТ необходимо устанавливать датчики положения якоря относительно полюсов для переключения тиристоров и утопления щеток перед заходом на них набегающего края коллектора.

## 2.2 Бескоммутационные линейные двигатели постоянного тока

Предварительный поиск бесколлекторного бескоммутационного варианта ЛДПТ привёл к формированию трёх идей, являющихся составной частью данной работы

На рисунке 7 представлена модель ЛДПТ, реализующая одну из этих идей. Неподвижным является якорь 1 с обмоткой, подвижным – полюс 2 с обмоткой возбуждения. Обмотка якоря 3 представляет собой короткие проводники, уложенные с обеих сторон якоря протекает ток одного направления, что исключает необходимость иметь специальный коммутатор.

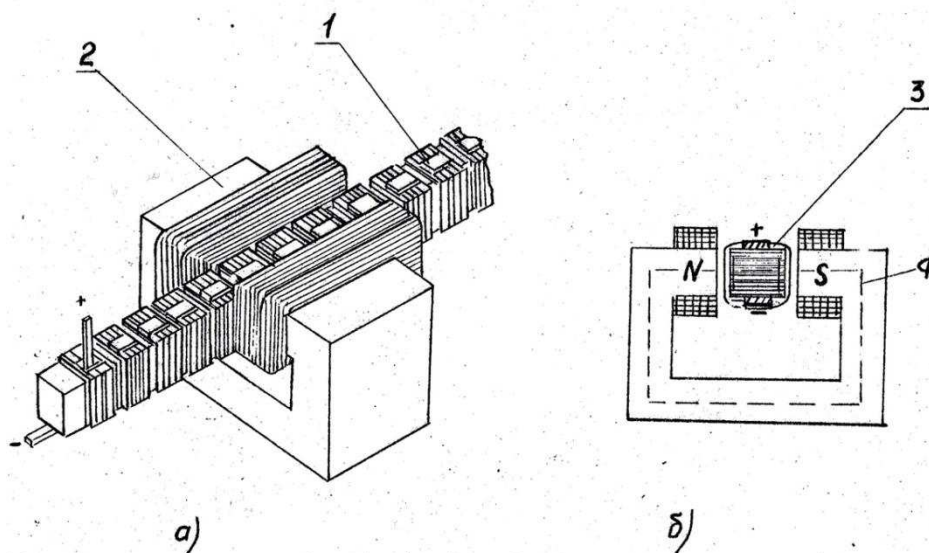


Рисунок 7 Модель бесколлекторного линейного двигателя

а) общий вид, б) поперечный разрез

Недостатками такого двигателя являются:

а) для питания обмотки якоря двигателя необходимо применение специального трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания:

б) для исключения деформации якоря от большого магнитного тяжения требуется применение специальной конструкции якоря.

На рисунке 8 представлена схема машины постоянного тока, в которой коммутация тока происходит непосредственно в обмотке якоря при неизменной полярности возбуждения. Обмотки якоря 1 и 2, так же как и полюсы 3,4, имеющие одинаковую полярность, могут быть подвижными и неподвижными. Катушки 1 и 2 включены параллельно на шины 7 и 8. Одна сторона каждой катушки включает в себя большое активное сопротивление 5, которое шунтируется герметизированным контактом 6. Размеры и расположения катушек должны быть такими, при которых магнитное поле всегда находится по одной стороне каждой катушки. При нахождении геркона 6 вне магнитного поля полюсов его контакт замкнут а по катушке протекает рабочий ток одного всегда направления. Взаимодействие его с полем полюсов приводит в движение полюсы, являющиеся подвижной частью, по направлению стрелки 9.

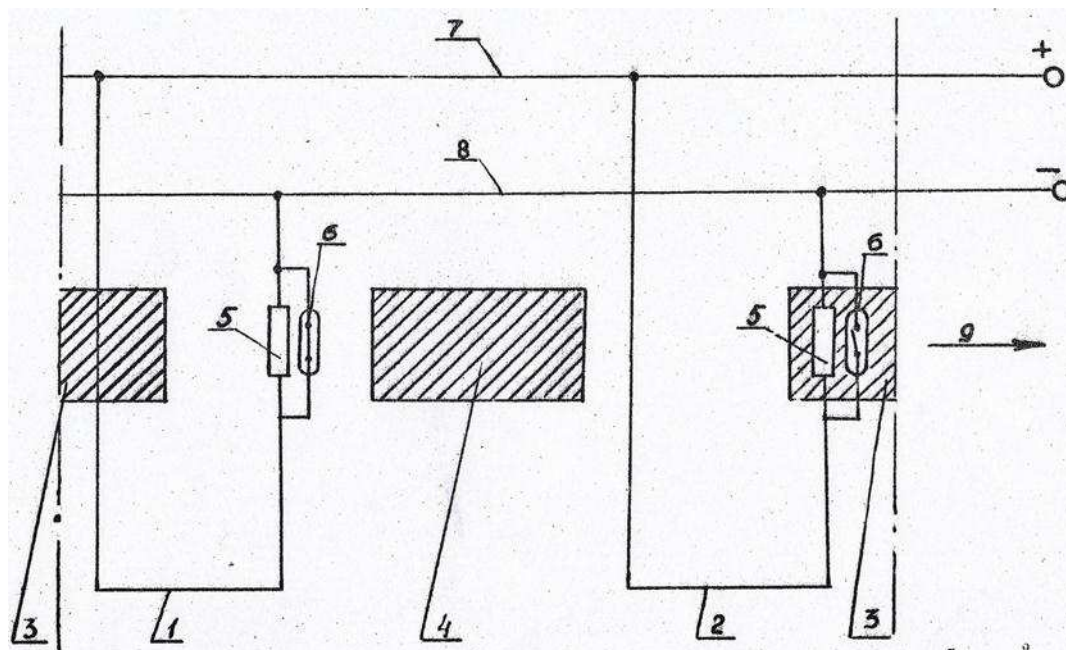


Рисунок 8 Машина постоянного тока с внутренней коммутацией тока

При нахождении геркона в магнитном поле полюсов его контакт разомкнут и в цепь катушки вводится большое активное сопротивление,



значительно ограничивающее ток потерь, направленный встречно рабочему току.

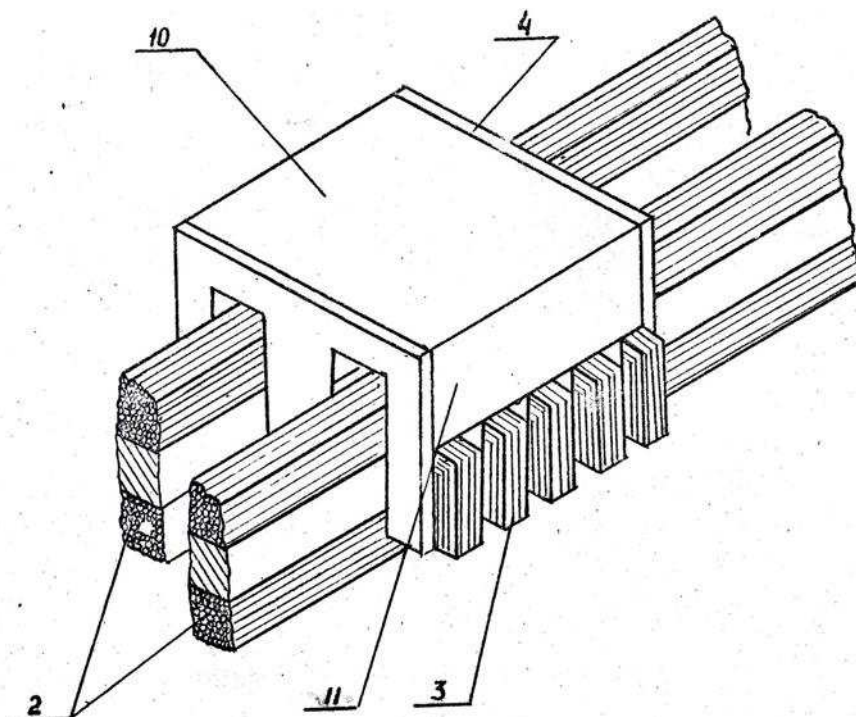


Рисунок 9 Бескоммутационный линейный двигатель постоянного тока

На рисунке 9 представлен бесконтактный бесколлекторный линейный двигатель постоянного тока, состоящий из подвижного якоря с обмоткой 3, ярма 4 и неподвижных полюсов 2.

### 2.3 Электромагнитные тормоза, работающие на принципе вихревых ТОКОВ

Изучение динамического режима работы двигателя показывает, что обмотка якоря работает в короткозамкнутом режиме и это наводит на мысль исключить обмотку якоря, а для наведения тока под влиянием магнитного потока полюсов использовать массивное тело якоря. В этом случае мы не будем иметь электромагнитный тормоз, работающий на

принципе вихревых токов или электромагнитный тормоз скольжения [1, 3, 5].

В практике известны вращающиеся электромагнитные тормоза, которые широко распространены в качестве измерителей моментов на валу испытываемых машин, как электрических, так и неэлектрических. Они также применяются для создания переменных нагрузок на различные механизмы и для остановки вращающихся частей вместо фрикционных тормозов [3, 5].

Например, известен многополюсный тормоз на вихревых токах, имеющий ротор с зубцами и обеспечивающий большие тормозные усилия при мелких токах возбуждения. [2]

Электромагнитные (индукционные) тормоза линейного исполнения неизвестны.

Основным элементом всякой индукционной муфты или тормоза является магнитная система (рисунок 10), состоящая из ферромагнитного магнитопровода 1 и обмоток возбуждения 2, питаемых постоянным током. Эта часть называется индуктором. Вторая часть называется якорем 3.

По аналогии с линейными двигателями, линейный электромагнитный тормоз (ЛЭМТ) получается “разворачиванием на плоскость” вращающегося ЭМТ (рисунок 11).

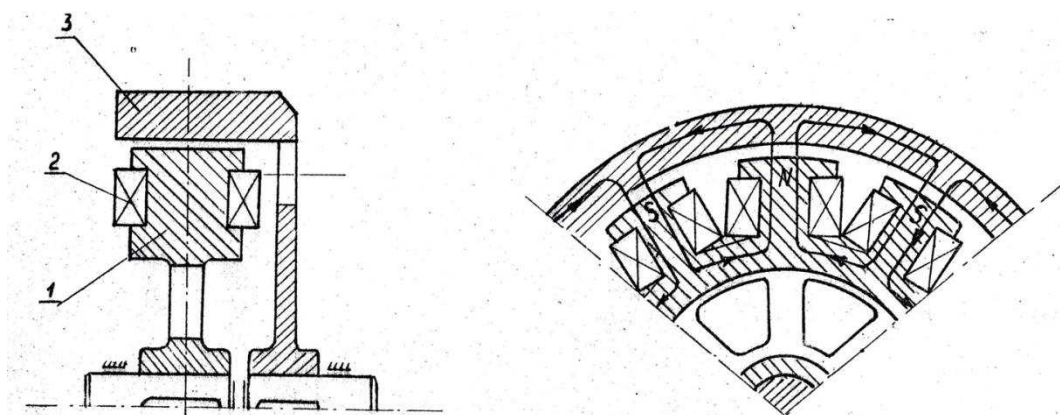


Рисунок 10 Электромагнитный тормоз вращения

При перемещении, например, индуктора 1, наводимые силовые линии пересекают поверхность якоря 3, в котором наводятся вихревые токи. Взаимодействие этих токов с магнитным потоком индуктора создает тормозящую силу, направленную противоположно движению индуктора.

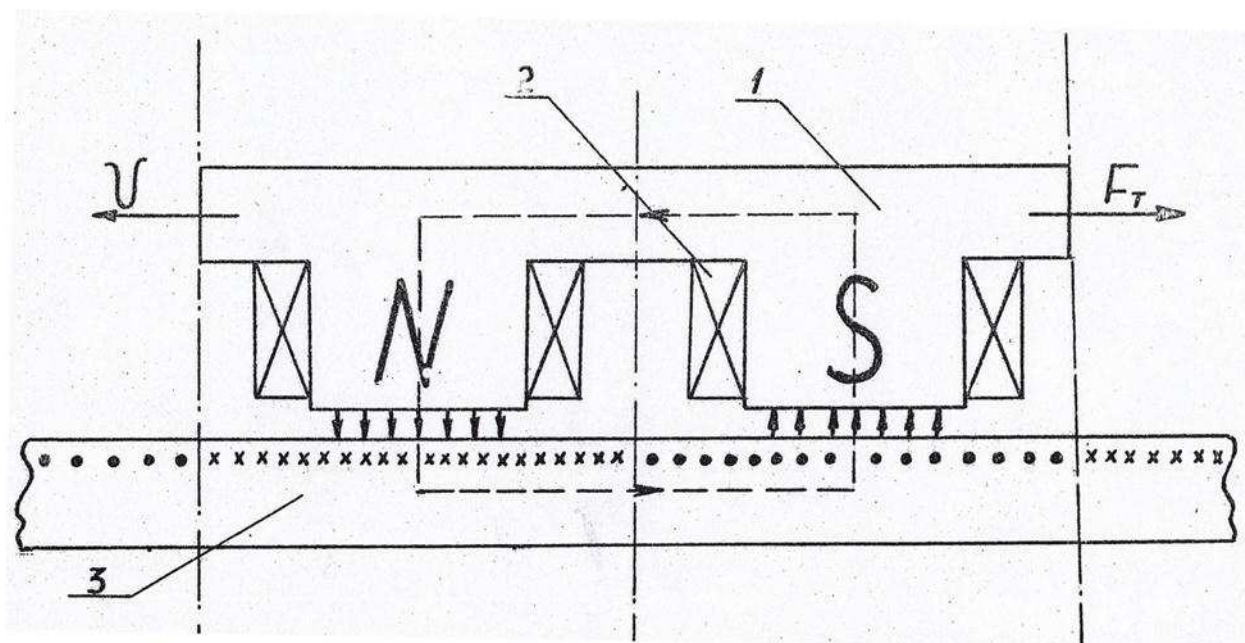


Рисунок 11 Линейный электромагнитный тормоз

Использование ЛЭМТ в качестве индукционного устройства для тяговых испытаний тракторов имеет следующие преимущества:

- а) значительно упрощается конструкция якоря
- б) отпадает необходимость в обмотке якоря
- в) отпадает необходимость в источнике питания обмотки якоря
- г) исключает коммутирующие устройства.

Окончательный выбор варианта индукционного устройства в пользу электромагнитного тормоза возможен после теоретического исследования тормозных режимов его применительно к конкретным условиям работы.

#### Литература:

1. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин: Учебное пособие для вузов / А.И.Инкин. – Новосиб.: ЮКЭА, 2002. – 464 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П.Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.



3. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Учебное пособие для вузов / О.Б.Буль, Свириденко И.С. и др.: под ред. О.Д.Гольдберга. – М.: Высшая школа, 2001. – 512 с.

4. Проектирование электрических машин: Учебник для электромех. и электроэнергет. спец. Вузов / И.П.Копылов, Б.К.Клоков, В.П.Морозкин и др.; под ред. И.П.Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

5. Беспалов В.Я. Электрические машины: Учебное пособие для вузов / В.Я.Беспалов, Н.Ф.Котеленец. – 3-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2010. – 320 с.

6. Онищенко Г.Б. Электрический привод: Учебник для вузов / Г.Б.Онищенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 288 с.

7. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов / В.М.Терехов, О.И.Осипов. – 3-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2008. – 304 с.

8. Соколова Е.М. Электрическое и электромеханическое оборудование: общепромышленные механизмы и бытовая техника: Учебное пособие для среднего проф. образования / Е.М.Соколова. – 2-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2003. – 224 с.

9. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов / И.П.Копылов. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.

## References

1. Inkin A.I. Jelektromagnitnye polja i parametry jelektricheskijh mashin: Uchebnoe posobie dlja vuzov / A.I.Inkin. – Novosib.: JuKJeA, 2002. – 464 s.

2. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskijh mashin: Uchebnik dlja vuzov / I.P.Kopylov. – 3-е изд., pererab. i dop. – М.: Vysshaja shkola, 2001. – 327 s.

3. Perehodnye processy v jelektricheskijh mashinah i apparatah i voprosy ih proektirovanija: Uchebnoe posobie dlja vuzov / O.B.Bul', Sviridenko I.S. i dr.: pod red. O.D.Gol'dberga. – М.: Vysshaja shkola, 2001. – 512 s.

4. Proektirovanie jelektricheskijh mashin: Uchebnik dlja jelektromeh. i jelektrojenerget. spec. Vuzov / I.P.Kopylov, B.K.Klokov, V.P.Morozkin i dr.; pod red. I.P.Kopylova. – 4-е изд., pererab. i dop. – М.: Vysshaja shkola, 2005. – 767 s.

5. Bepalov V.Ja. Jelektricheskije mashiny: Uchebnoe posobie dlja vuzov / V.Ja.Bepalov, N.F.Koteleneec. – 3-е изд., stereotip. – М.: Akademija, 2010. – 320 s.

6. Onishhenko G.B. Jelektricheskijj privod: Uchebnik dlja vuzov / G.B.Onishhenko. – 2-е изд., stereotip. – М.: Akademija, 2008. – 288 s.

7. Terehov V.M. Sistemy upravlenija jelektroprivodov: Uchebnik dlja vuzov / V.M.Terehov, O.I.Osipov. – 3-е изд., stereotip. – М.: Akademija, 2008. – 304 s.

8. Sokolova E.M. Jelektricheskoe i jelektromehanicheskoe oborudovanie: obshhepromyshlennye mehanizmy i bytovaja tehnika: Uchebnoe posobie dlja srednego prof. obrazovanija / E.M.Sokolova. – 2-е изд., stereotip. – М.: Akademija, 2003. – 224 s.

9. Kopylov I.P. Jelektricheskije mashiny: Uchebnik dlja vuzov / I.P.Kopylov. – 3-е изд., ispr. – М.: Vysshaja shkola, 2002. – 607 s.