

# ПЛАНАРНЫЕ И ШТОКОВЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

## Штоковые ЛД

Shaft Linear - штоковые (цилиндрические) линейные двигатели (ЛД) в ЭИ станках



**Первый показ ЭИ станка со штоковыми линейными двигателями - JIMTOF-2009**

Штоковые ЛД производятся рядом компаний.

Например, японской **JMC Hillstone** совместно с Nippon Pulse Company (NPC). **Производство - с 2005 г.**

Другие изготовители штоковых ЛД: LinMot, PBA Systems, Orientalmotor, Parker, Ametek, Delta и т.д.

Помимо названия shaft linear motor (штоковые ЛД) такие двигатели известны как “трубчатые” и “цилиндрические”.

*Штоковые ЛД разрабатывались для замены пневмо-, гидро- и ШВП-приводов в роботах-манипуляторах, штабелекладчиках, сборочных платформах, а также мед- и спецоборудовании. Проволочные электроэлектронные станки - первое известное применение штоковых ЛД в станках вообще.*

Штоковые ЛД имеют бессердечниковые катушки и, как результат, недостаточную тягу. Такими ЛД можно оснащать лишь малые и средние модели ЭИ вырезных станков. Для прошивных станков такие двигатели непригодны - штоковый ЛД попросту не поднимет тяжелый электрод!

**Главное достоинство штоковых ЛД:**

- Штоковые ЛД легко встроить на место ШВП-привода в существующие устройства (станки).

Но это, по сути, единственное достоинство!

**Главные недостатки:**

- **дефицит тяги** (ЭМ катушки - бессердечниковые!);
- **проблемы с теплоотводом** (его отсутствие!);
- **разнонаправленные биения магнитного штока и динамическая асимметрия зазора (вектор тяги пляшет хаотично от направления подачи!);**
- **хлипкая конструкция** (шток крепится лишь на концах внатяг и периодически требует перенатяжений)

Иллюстрация из сервисной инструкции изготовителя штоковых ЛД



Из-за продольных волн и разнородности параметров магнитов и их частей шток при движении “выплясывает твисты”

## Sodick

Разработка электроискровых (ЭИ) станков с линейными двигателями (ЛД) с 1990 г.



**Серийное производство стартовало в 1998 г.**

До 2000 г. производились лишь электроискровые прошивные станки с линейными двигателями (ЛД) только по оси Z. С 2000 г. появились электроискровые (ЭИ) проволочно-вырезные станки с ЛД по осям XY и прошивные с ЛД по осям XYZ.

**С 2001 г. станки оснащаются ЛД по всем осям:**

- ЭИ координатно-прошивные - по осям XY и Z
- ЭИ проволочно-вырезные - по осям XY и UV

**Линейные двигатели Sodick** - собственная разработка компании, а также и собственное производство Sodick - вплоть до редкоземельных Ne-Fe-B магнитов.

**Линейные двигатели Sodick** - это плоские панели постоянных магнитов и блоки электромагнитных (ЭМ) катушек, между которыми постоянный зазор = 0,4 мм.

Двигатели устанавливаются параллельно плоскости перемещений. Условно их можно назвать “плоско-параллельными”, однако более распространен термин **планарные линейные двигатели**.

**Главные достоинства планарных ЛД Sodick:**

- **большая мощность и тяга** благодаря сердечниковым ЭМ катушкам;
- **идеальный теплоотвод** - блок электромагнитных катушек крепится всей плоскостью на массивные элементы конструкции с высокой теплопроводностью;
- **Неизменный константный зазор = 0,4 мм**
- высочайшая динамическая точность в течение всей эксплуатации (**вектор тяги максимально совпадает с направлением подачи**);
- надежность и долговечность, подтверждаемые двумя с лишним 10-летиями успешной эксплуатации;
- особо **жесткая конструкция**.

**Недостаток:**

- планарный ЛД нельзя встроить в обычный станок “под ШВП”; такие ЛД создаются “индивидуально” для станков, которые, в свою очередь, разрабатываются под эти ЛД и соответствующие им нагрузки.

**Штоковый ЛД** встраивается в станок на место ШВП.

Тонкий магнитный шток - толщиной чуть больше пальца - легко деформируется, возникают разнонаправленные боковые биения, фатально влияющие на точность станка. Причин "гуляния" по меньшей мере две:

- 1) продольные волны, вызываемые силами сжатия и растяжения, которые порождаются неоднородностью плотности магнитных полей ЛД;
- 2) отклонения параметров отдельных магнитов на штоке, а также разнородность магнитных параметров разных частей одного магнита - двух совершенно одинаковых магнитов не бывает!



"Твисты" магнитного штока рожают переменные разнонаправленные боковые нагрузки на направляющие. Известно, что направляющие рассчитаны на вертикальные нагрузки, но быстро изнашиваются и теряют точность, если нагрузки боковые. Чтобы тонкий магнитный шток меньше гулял, изготовители штоковых ЛД предписывают крепить магнитный шток клиньями внатяг (!) в опоры на станине еще на заводе-изготовителе станков.

*Насколько хватает такого натяга? Как часто придется "перенатягивать" шток уже в рабочем станке самим пользователям? И "почём" это будет обходиться?*

Опасность хаотичных плясок и твистов штока возрастает многократно, когда частота таких колебаний совпадает с собственной резонансной частотой конструкции... В любом станке имеется множество резонансных областей, которые зависят от физических характеристик и от изменений температуры. Ситуаций предостаточно!

Штоковые ЛД бессердечниковые и демонстрируют **хронический дефицит тяги**. Известно, что сердечниковая ЭМ катушка создает магнитное поле на порядки ( $\approx \times 1000$ ) сильнее, чем генерирует бессердечниковая. Правда, коэффициент использования магнитного поля в штоковых ЛД несколько выше (благодаря кольцевым магнитам и трубчатой конструкции) - примерно в 2 раза. Но это лишь незначительно компенсирует потери от отсутствия сердечников в катушках.

Именно из-за недостатка тяги штоковые ЛД не ставят в прошивные станки и крупногабаритные проволочно-вырезные. Дефицит тяги порождает проблемы с плавностью на малых приращениях, когда отрабатываются подачи с микронной дискретностью. Здесь штоковый ЛД ведет себя словно трогаящийся рывками маломощный перегруженный грузовик!

**Компания Sodick начала разработку ЛД** в начале 90-х в обстановке секретности. У компании уже был печальный опыт: "заимствование" первоначальной схемы безизносной ЭИ обработки.

Разработчики перепроверили и испытали на стендах множество схем ЛД. Тестировались и конструкции с кольцевыми магнитами, как в новомодных штоково-цилиндрических ЛД. Все было забраковано, и только планарная (плоско-параллельная) схема ЛД оказалась идеальной для станков. Но с одной оговоркой:

под приводы с планарными ЛД необходимо заново создавать весь станок. По сути,

**линейный станок Sodick с планарными линейными двигателями - есть единая мехатронная система.**

Машина, создаваемая заново, - это большие затраты, но... **дешево хорошо не бывает!** Это подтверждает опыт других станкостроительных компаний: практически все станки с ЛД ведущих мировых изготовителей (не электроискровые) используют именно планарные ЛД - другой проверенной временем альтернативы нет!

Сила взаимного притяжения между панелью постоянных магнитов и блоком электромагнитных катушек примерно в 6 раз больше той тяги, которая создается при работе ЛД в направлении подачи. Однако, если станок изначально конструируется для установки такого ЛД, проблема решается сама собой: жесткость литых конструкций значительно выше тех сил, которые возникают при работе ЛД, а нагрузка приходится на направляющие, которые на эти нагрузки как раз и рассчитаны. В станках Sodick применены направляющие SSR фирмы ТНК (технология caged ball), сконструированные для использования прежде всего в прецизионных измерительных машинах. Эти направляющие выдерживают перемещения в 100 раз больше, чем расстояние от Земли до Луны и обратно.

Нагрузки на направляющие только вертикальные или в направлении, перпендикулярном плоскости ЛД. **Боковые нагрузки при работе планарных ЛД отсутствуют.** И это гарантирует сохранение первоначальной точности позиционирования в течение многих лет.

С 2006 г. Sodick предоставляет 10-летнюю гарантию точности позиционирования на все свои линейные станки. На практике **точность сохраняют даже станки, выпущенные в 1998 г.**

В линейных станках Sodick используются сердечниковые ЛД. **Магнитные сердечники усиливают магнитные поля и тягу на порядки.** Бессердечниковые ЛД Sodick применяет лишь в нанопрецизионных станках с дискретностью подач менее 10 нм, но ставит на каждую ось подач по два и более таких линейных двигателей.

## Штоковые линейные двигатели

У бессердечниковых ЛД теоретически должна отсутствовать прерывистость подач, возникающая из-за зубцовых составляющих магнитных полей. На практике плавность подач зависит не только от наличия или отсутствия сердечников, но и от взаиморасположения катушек и постоянных магнитов, а также - и прежде всего - от системы управления ЛД.

Прерывистость и скачкообразность подач может возникать, с другой стороны, как результат дефицита тяги в штоковых бессердечниковых ЛД. Особенно это может проявляться на малых приращениях, когда обрабатываются подачи с дискретностью порядка микрона при резании, например, маломодульного зубчатого колеса.



*Шток линейного цилиндрического двигателя и трубки системы охлаждения бессердечниковых катушек*

Из-за дефицита тяги бессердечниковые ЛД большую часть времени работают в режимах, близких к максимальным. Чтобы тяга выросла, через бессердечниковые катушки должен идти многократно больший ток, чем через катушки сердечникового ЛД. Это провоцирует как больший нагрев, так и повышенное электропотребление в штоковых ЛД.

## Планарные линейные двигатели

Теоретически у линейных двигателей с сердечниковыми ЭМ катушками может возникать прерывистость подач. Однако за много лет успешной эксплуатации линейных ЭИ станков Sodick с сердечниковыми катушками не было ни одной рекламации о якобы имевшей место быть неплавности подач! Все приводы станков Sodick работают плавно и эффективно обрабатывают подачи с особо малыми приращениями при микрорезании.

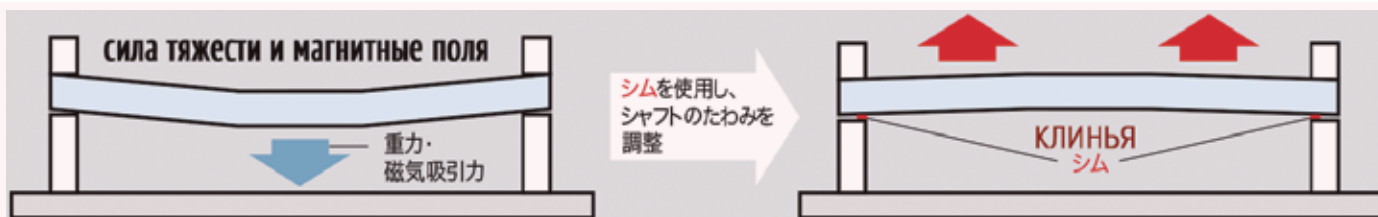
Плавность подач обеспечивается собственной системой управления ЛД K-SMC (Kaneko Sodick Motion Controller), разработанной под руководством ведущего специалиста Sodick Юджи Канеко. Особое соотношение числа Ne-Fe-B магнитов и сердечниковых катушек и их взаимное расположение определено многолетними исследованиями и экспериментами. Это know-how компании Sodick. Контроллер K-SMC, а также взаиморасположение и соотношение числа магнитов и катушек вкуче с уникальным алгоритмом управления катушками полностью гарантирует плавность и равномерность подач на любых режимах.

Прерывистость и скачкообразность подач на малых приращениях исключается также благодаря большому резерву тяги в сердечниковых ЛД Sodick.

Еще одно достоинство планарных ЛД в станках Sodick - отсутствие нагрева или незначительный нагрев, в чем легко убедиться, потрогав двигатель рукой (лучше собственной!). Попробуйте! Это относится ко всем проволочно-вырезным ЭИ станкам Sodick с ходами по XY до 600 мм.

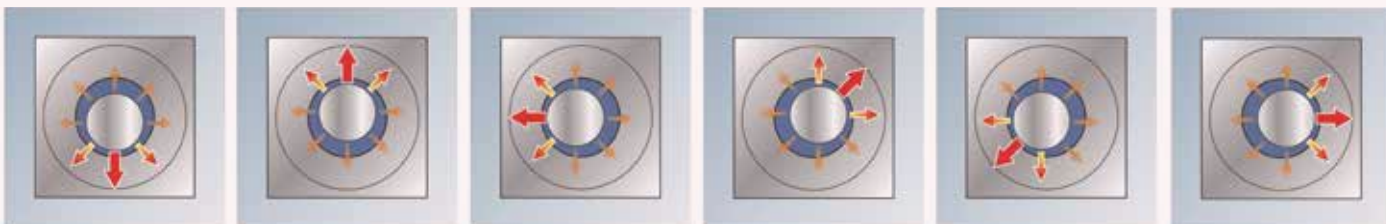
Греются лишь постоянно сильно нагруженные ЛД прошивных станков, но они очень эффективно охлаждаются. (См. на след. странице.)

### Иллюстрация из сервисной инструкции изготовителя штоковых линейных двигателей:



*Прогибы штока изготовитель предлагает регулировать и устранять с помощью клиньев. Вот такой вот “хай-тек”!*

### Изменение зазора в штоковых линейных двигателях в процессе их работы:



*Тонкий шток неизбежно прогибается как под воздействием меняющихся магнитных полей, так и под собственной тяжестью. В результате при любом перемещении катушек вдоль штока последний разнонаправленно “гуляет”, меняя, как следствие, зазор. Ширина зазора в штоковых двигателях - величина неопределенная, фактически “танцующая”.*



## Проверенные временем планарные линейные двигатели собственной разработки и производства

# Sodick



Как панели магнитов, так и блоки ЭМ катушек планарных линейных двигателей Sodick жестко крепятся на массивные конструкции станков, что полностью исключает какие-либо деформации частей ЛД и станков. **Попробуйте-ка согнуть чугунную станину или колонну! Или массивный стол!** Зазор между магнитами и катушками всегда постоянен - 0,4 мм. Отсюда неизменно высокая точность в течение всей долгой жизни станка.

Массивные литые чугунные конструкции, к которым крепятся ЭМ катушки, обеспечивают идеальный теплоотвод, если катушка нагревается. Это еще один важный фактор, обеспечивающий **отсутствие нагрева или лишь незначительный нагрев.**



Охлаждение требуется лишь в ЭИ прошивных станках с постоянно тяжело нагруженными ЛД по оси Z (отработка быстрых релаксаций тяжелого электрода) и в меньшей степени ЛД по осям XY, непрерывно нагруженным отработкой осцилляций. В станках Sodick приводы по Z сдвоенные и охлаждаются.

*Трубки масляного охлаждения ЛД оси Z.*

Что касается проволочно-вырезных станков Sodick, то принудительным охлаждением оснащаются лишь катушки планарных ЛД по оси X, если ход подачи превышает 750 мм.

Принудительное охлаждение в компактных и средних проволочно-вырезных ЭИ станках Sodick не требуется, т.к. нагрева практически нет!

<https://sodick.sodicom.biz/ru/shaft-linear-vs-planar-linear/>

*Конструкция вырезного станка Sodick, изначально разработанного под линейные приводы по осям XY и UV.*

*Широкая мощная станина, движение по X - жесткая каретка стола, движение по Y - массивная колонна. Особо жесткий конусный механизм UV.*

