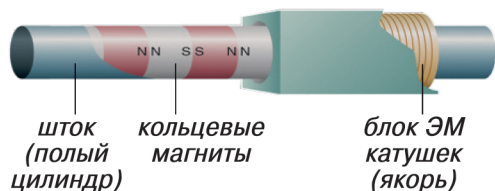


# ПЛАНАРНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ И ШТОКОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

## Штоковые двигатели

Shaft Motor - штоковые (цилиндрические) линейные двигатели в ЭИ станках



**Первый показ ЭИ станка со штоковыми двигателями - JIMTOF-2010**

Штоковые двигатели производятся рядом фирм.

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 motor (штоковые двигатели) такие двигатели известны как “трубчатые” и “цилиндрические”.

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

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

**Главное достоинство штоковых двигателей (ШД):**

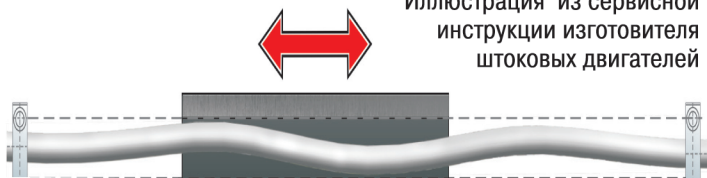
- ШД легко встроить на место ШВП-привода в существующие устройства (станки).

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).

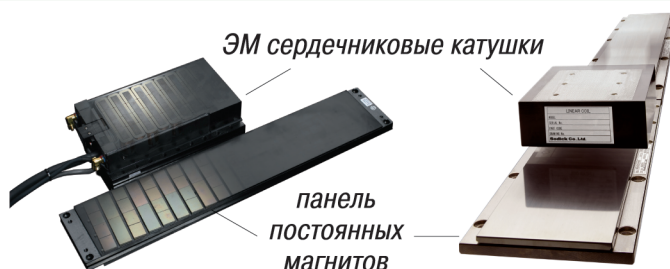
Иллюстрация из сервисной инструкции изготовителя штоковых двигателей



*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 (электроэрозионные) прошивные станки с линейными двигателями (ЛД) только по оси Z. С 2000 г. появились ЭИ вырезные станки с ЛД по XY и прошивные с ЛД по 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.

**ЛД Sodick** - это плоские панели постоянных магнитов и электромагнитные (ЭМ) катушки, которые разделяет **постоянный зазор = 0,4 мм**. Плюс линейки **10 нано**.

ЛД Sodick можно назвать “плоскопараллельными”, однако более распространен термин **планарные ЛД**.

Станки Sodick с планарными линейными двигателями суть **единые мехатронные системы**: ЛД создаются для станков “индивидуально”, а станки, в свою очередь, создаются под эти ЛД и соответствующие нагрузки.

**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”; планарные ЛД “индивидуальны” для каждого станка, который, в свою очередь, разрабатывается под эти ЛД и соответствующие им нагрузки.

### ШД встраивается в станок на место ШВП.

(на фото ниже: как была ШВП смещена от центра в старом станке, так и в новом смещен от центра уже штоковый ЛД).

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 двигателей 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 пользователями? 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 двигатели бессердечниковые и демонстрируют **хронический дефицит тяги**. Известно, что сердечниковая ЭМ катушка создает магнитное поле на порядок ( $\approx \times 1000$ ) сильнее, чем генерирует бессердечниковая. Правда, коэффициент использования магнитного поля в штоковых двигателях 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 ШД 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 двигатель ведет себя словно трюгающийся 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 стандах 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 (цилиндрические) двигатели

У бессердечниковых ШД 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 двигателях. Особенно это может проявляться на малых приращениях, когда отрабатываются подачи с дискретностью порядка микрона при резании, например, маломодульного зубчатого колеса.



Шток штоково-цилиндрического двигателя и трубки системы охлаждения бессердечниковых катушек

Из-за дефицита тяги бессердечниковые ШД 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 ШД.

## 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.

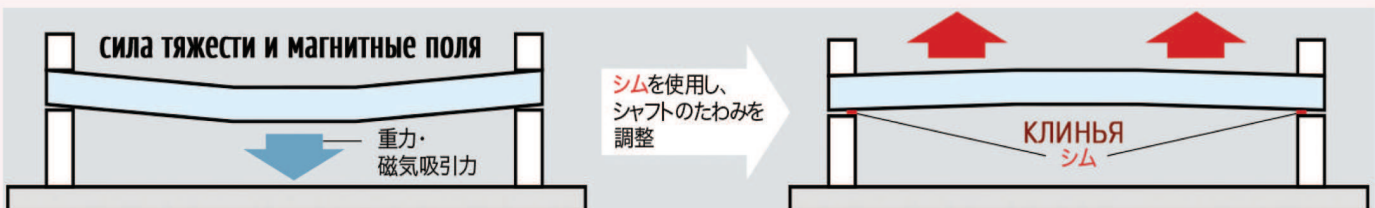
Плавность подач обеспечивается собственной системой управления ЛД K-SMC (Kaneko Sodick Motion Controller), разработанной под руководством ведущего специалиста Sodick Юджи Канеко. Особое соотношение числа Ne-Fe-B магнитов и сердечниковых катушек и их взаимное расположение определено многолетними исследованиями 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 гарантируют 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.

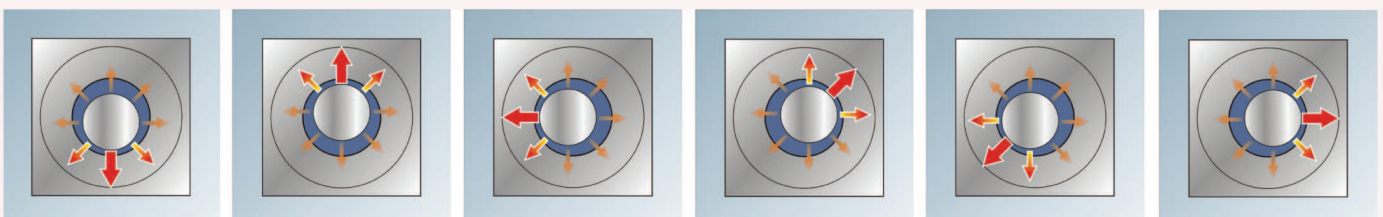
Греются лишь постоянно сильно нагруженные ЛД прошивных станков, но они очень эффективно охлаждаются. (См.на след.странице.)

### Иллюстрация из сервисной инструкции изготовителя штоково-цилиндрических двигателей:



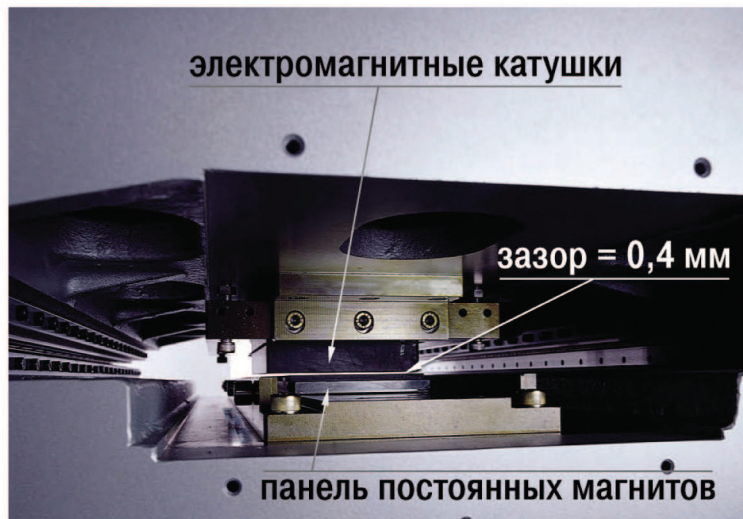
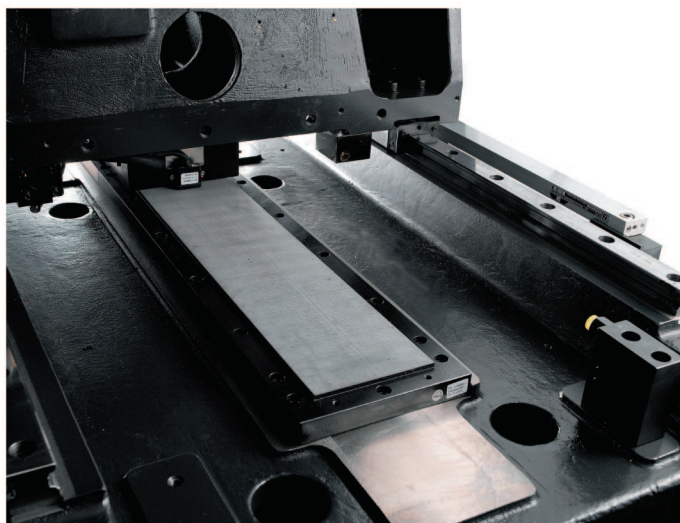
Прогибы штока изготовитель предлагает регулировать и устранять с помощью клиньев. Вот такой вот “хай-тек”!

### 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”.

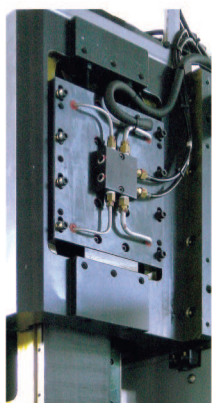
## Проверенные временем планарные ЛД собственной разработки и производства



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

*Трубки масляного охлаждения ЛД оси Z.*

Чтобы предотвратить нагрев, часть станков Sodick оборудуются системами охлаждения.



Охлаждение необходимо в ЭИ прошивных станках, в которых длительно нагружены ЛД по Z (отработка быстрых релаксаций электрода) и ЛД по осям XY, (отработка осцилляций).

В прошивных станках Sodick приводы по Z сдвоенные, и они охлаждаются.

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

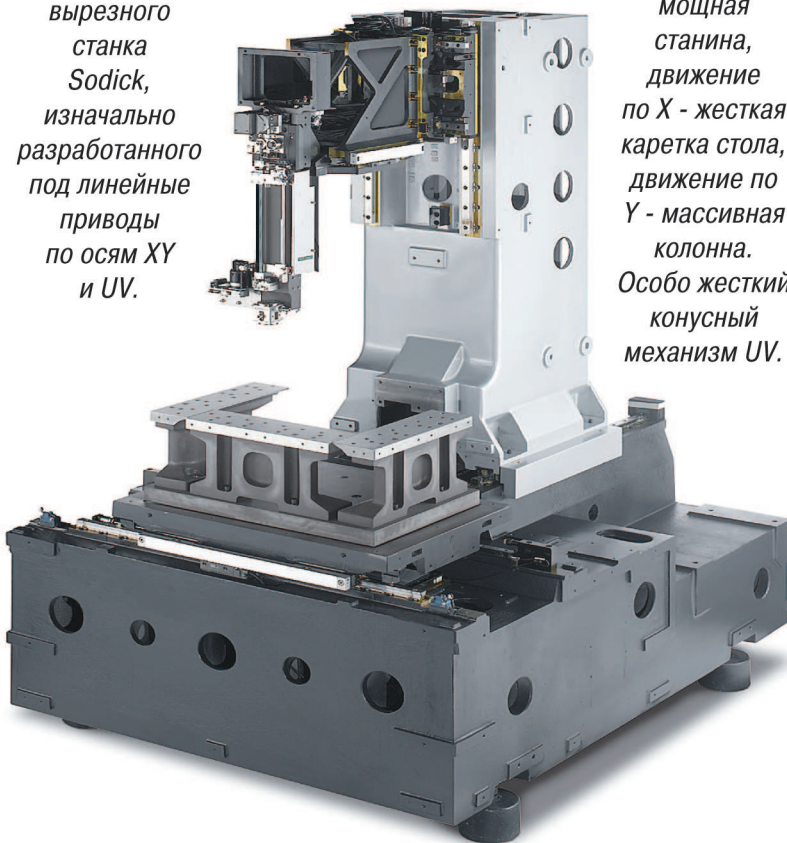
Принудительное охлаждение в компактных и средних вырезных ЭИ станках Sodick не требуется, т.к. нагрева практически нет!

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.**

*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.*

В обратной связи управления ЛД Sodick использует оптические линейки с дискретностью **10 или 5 или 1 нм (нанометров).**

