

# Линейный импульсный трансформатор

Доцент отд. материаловедения Юдин А.С.



School of Advanced  
Manufacturing  
Technologies

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



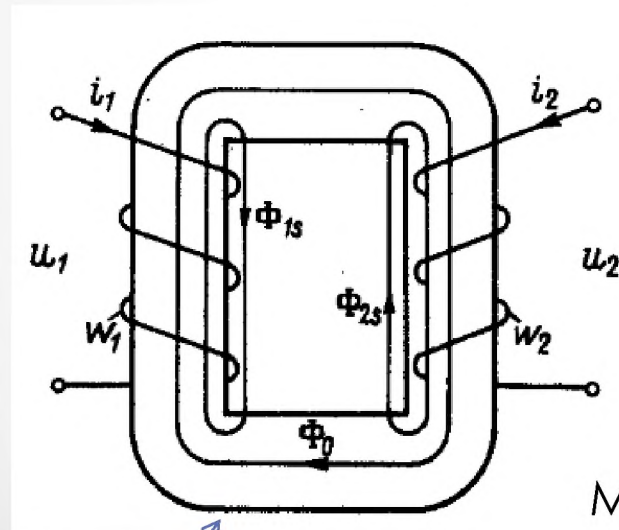
# План

- Определение и общие сведения
- Принцип работы
- История
- Примеры
- Некоторые соотношения

# Определение

## Освежим знания

**Трансформатор** – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки, предназначенное для преобразования посредством магнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Если **ТОКИ** имеют **ВИД ИМПУЛЬСОВ** – трансформатор называют **ИМПУЛЬСНЫМ**.



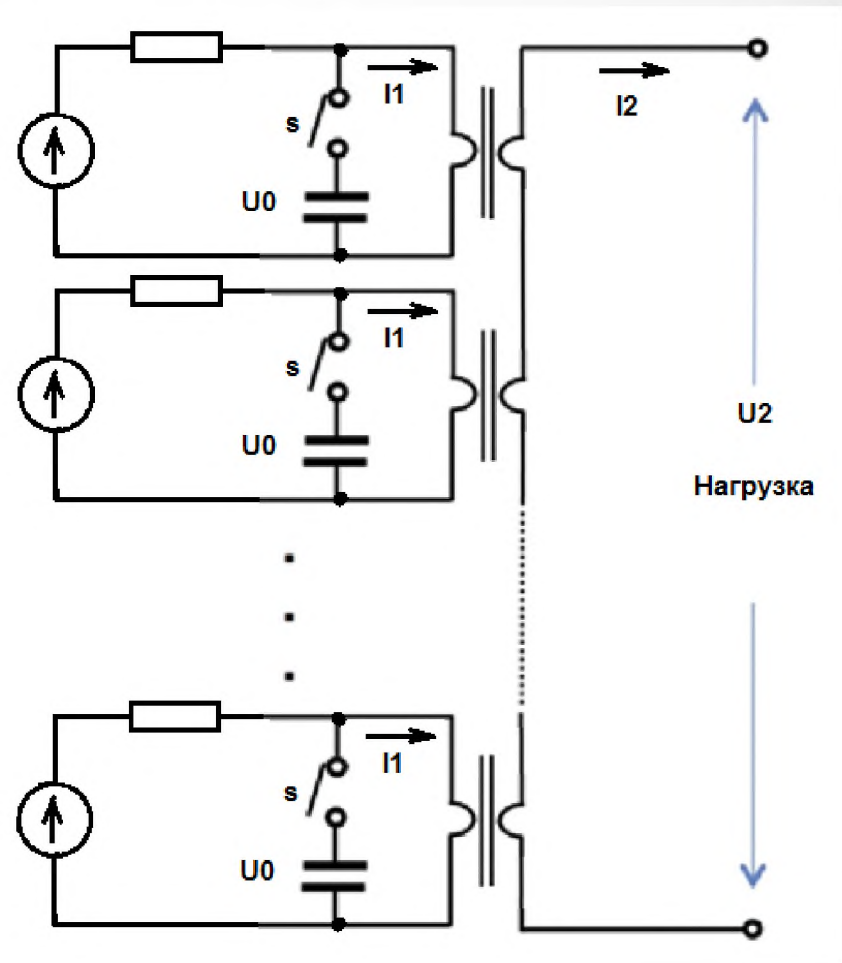
$$\frac{U_2}{U_1} \approx n \approx \frac{N_2}{N_1}$$

- $\Phi_0$  – основной, рабочий магнитный поток
- $\Phi_{1s}$  – магнитный поток рассеяния обмотки 1
- $\Phi_{2s}$  – магнитный поток рассеяния обмотки 2

МДС – магнитодвижущая сила  $F = \sum i_j \cdot w_j$

Магнитная система

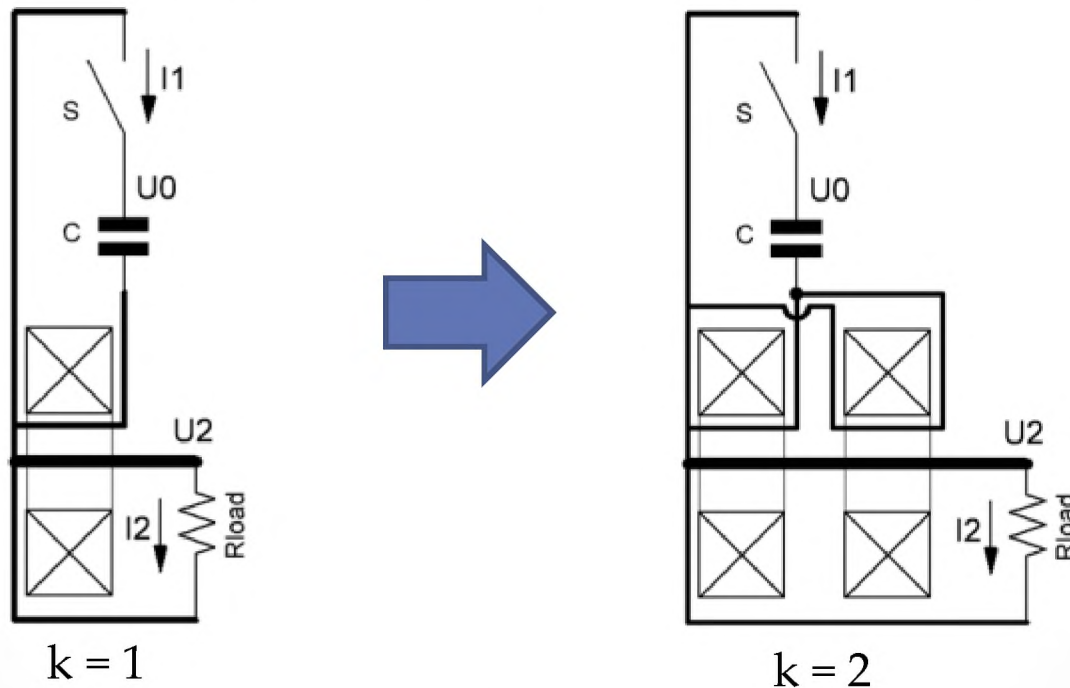
# Схема ЛИТ



**Линейный импульсный трансформатор (ЛИТ)** – это набор установленных друг за другом одновитковых трансформаторов с кольцевыми сердечниками и общей одновитковой вторичной обмоткой.

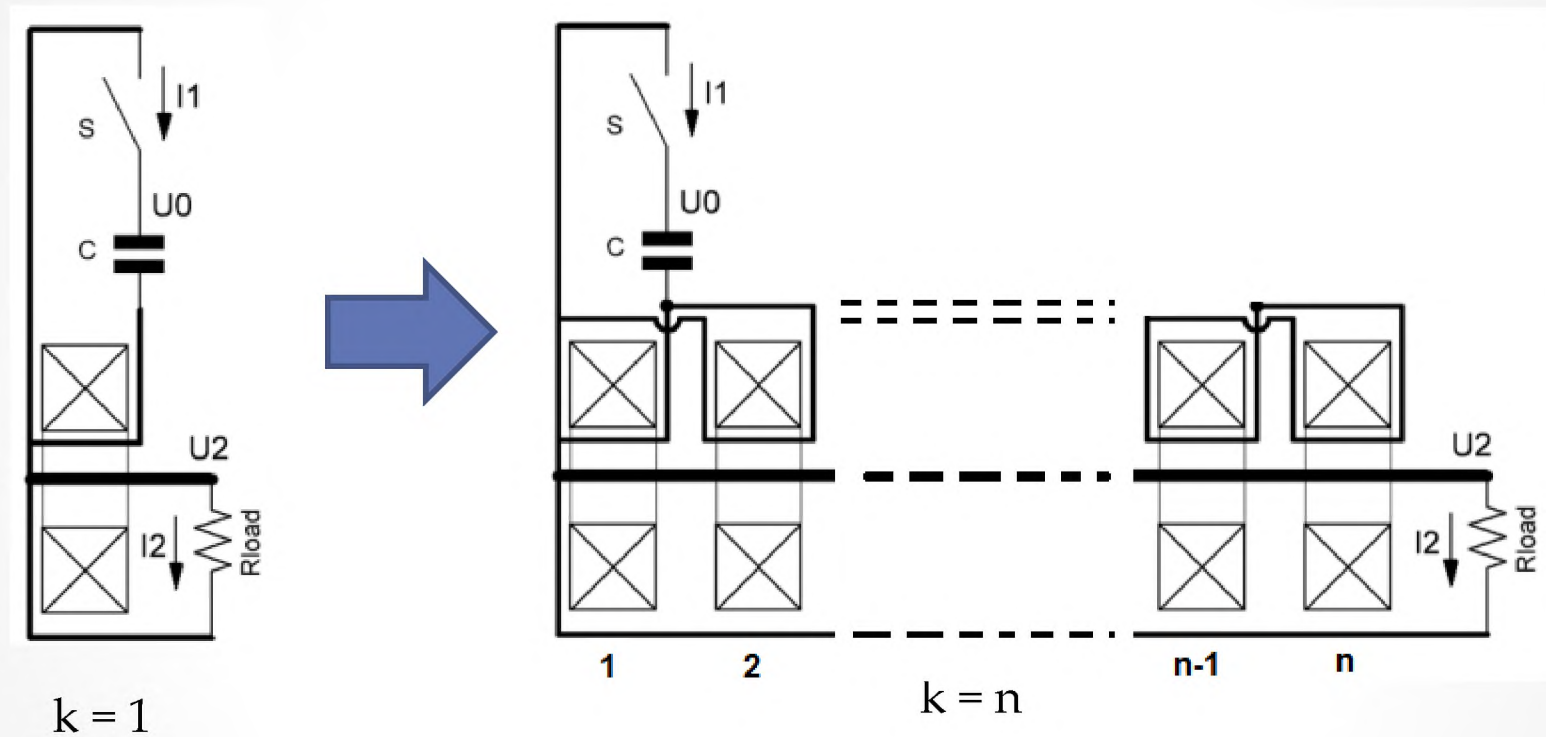
# Схема ЛИТ

Простейший вариант трансформатора ( $k = 1$ ) можно видоизменить добавив еще один индуктор, что будет эквивалентно добавлению витка во вторичную обмотку традиционного трансформатора ( $k = 2$ )



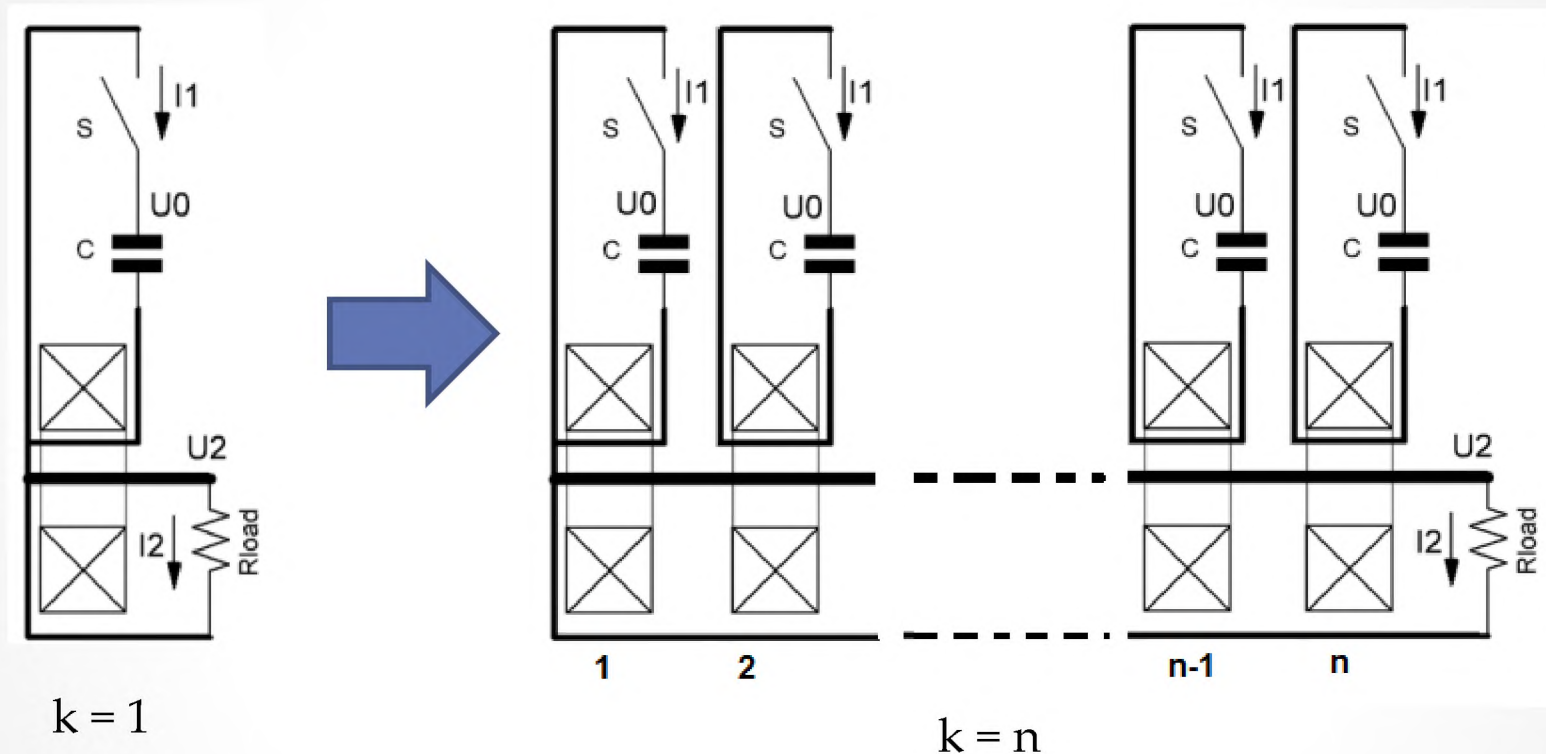
При этом напряжение на нагрузке увеличивается, а ток нагрузки уменьшается пропорционально количеству индукторов при сохранении мощности нагрузки аналогично традиционной схеме трансформации.

# Схема ЛИТ



Увеличивается ток через коммутатор  $S$

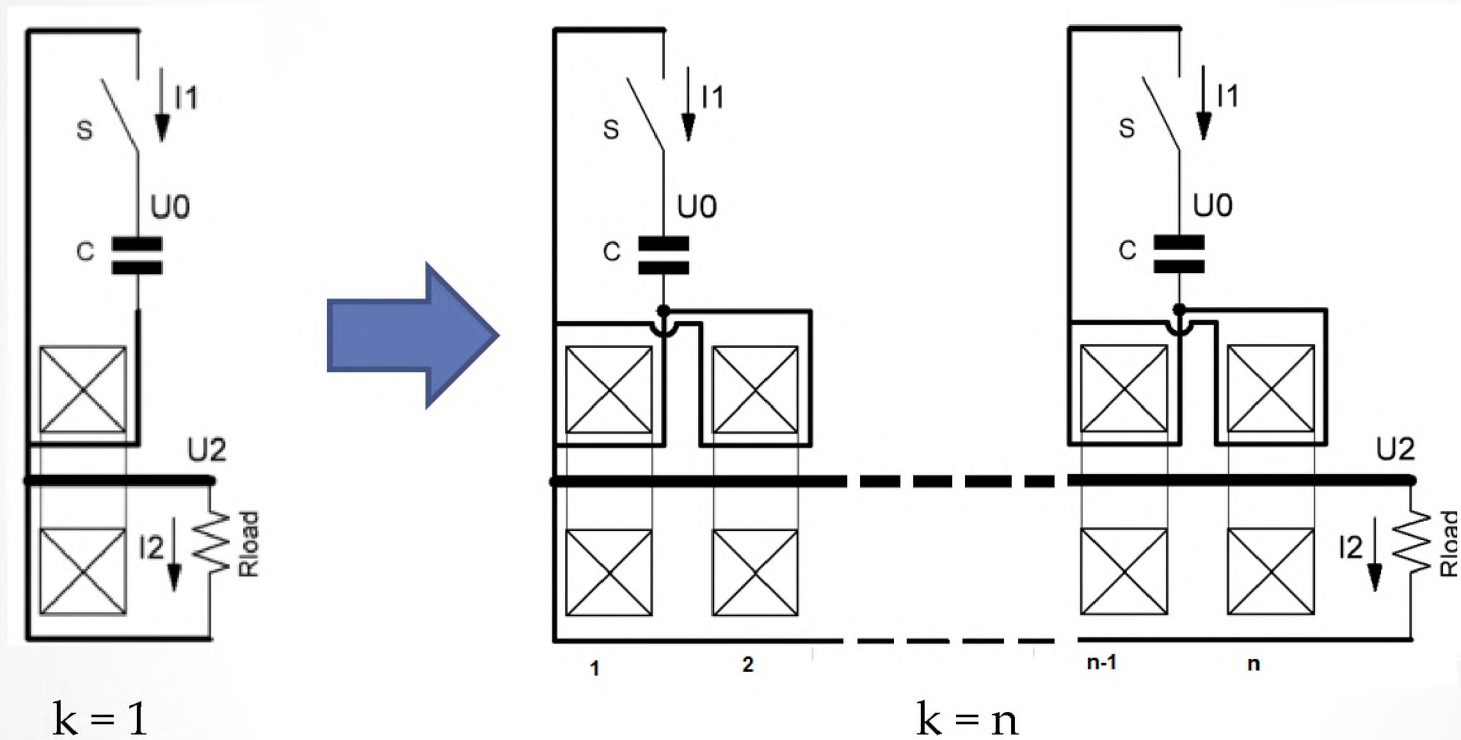
# Схема ЛИТ



Возникает необходимость синхронизации моментов включения первичных коммутаторов  $S$ . Однако такая схема позволяет при сохранении энергии существенно снизить время её выделения, за счет уменьшения емкости единичного конденсатора поскольку

$$\tau \approx \sqrt{LC}$$

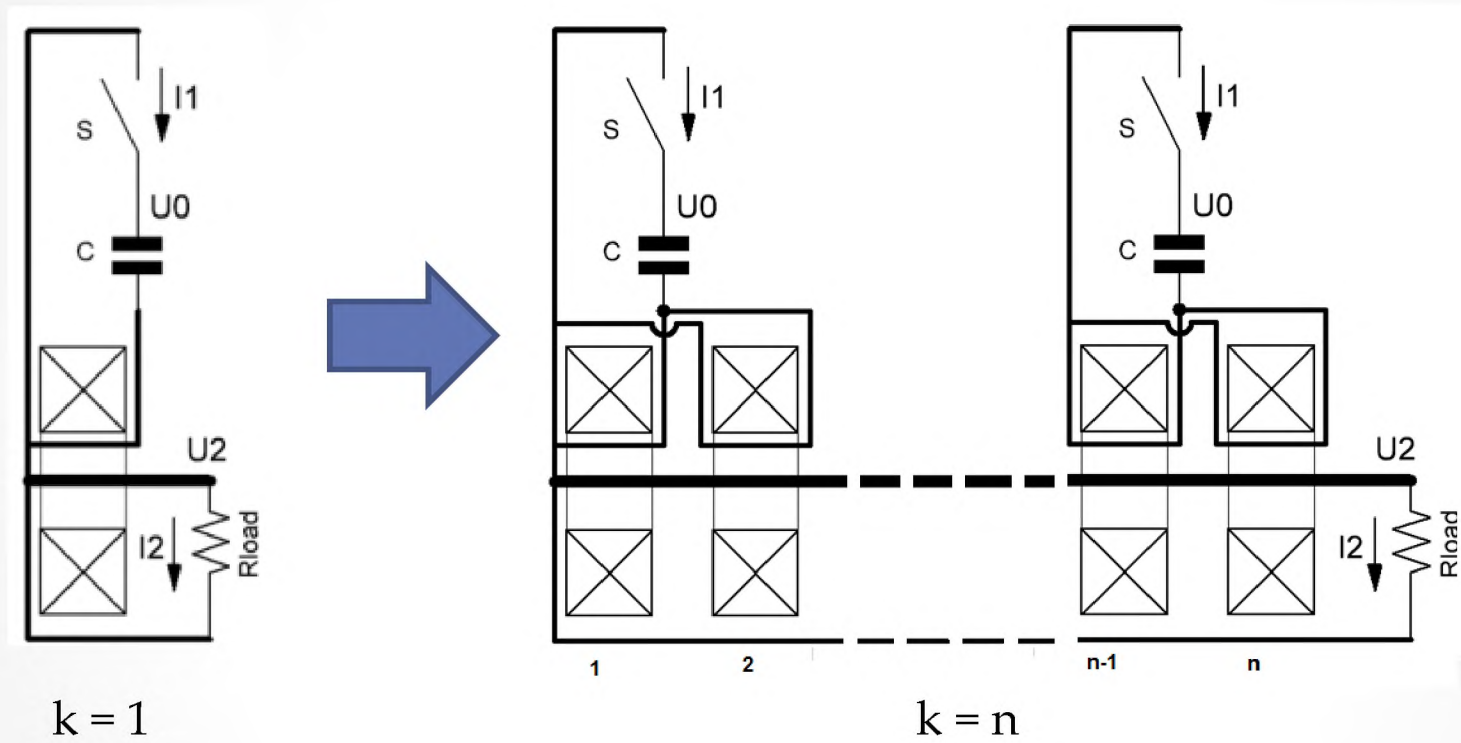
# Схема ЛИТ



Альтернатива, это комбинация предыдущих двух вариантов

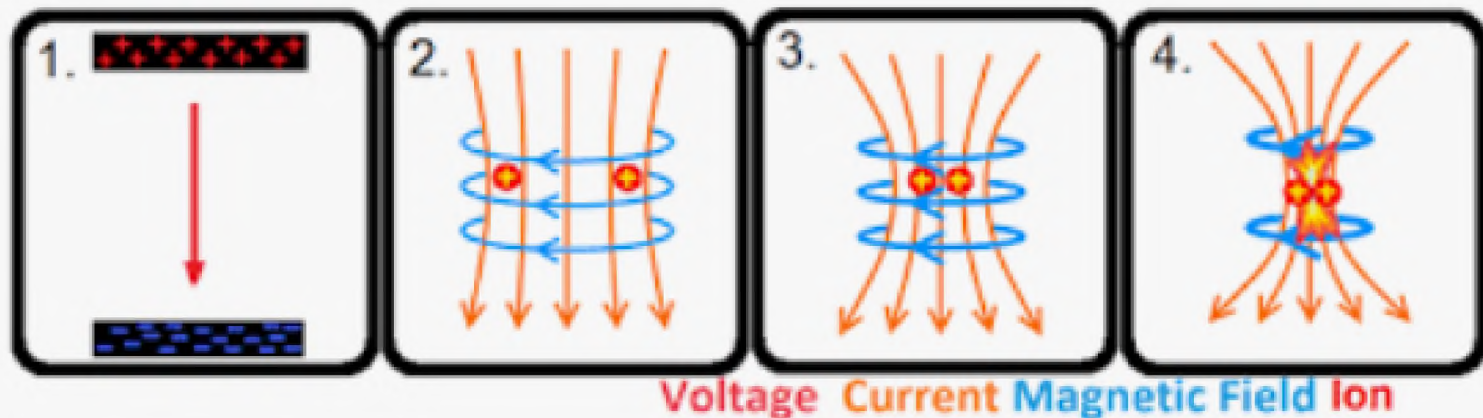


# Схема ЛИТ



# История ЛИТ

В 1980-х годах системы индуктивного накопления энергии (IES – inductive energy storage) с плазменными размыкающими переключателями (POS – plasma opening switches) оказались в центре внимания исследований импульсной энергии во всем мире для получения мощных импульсов **длительностью 100 нс**, необходимых для исследования термоядерного синтеза (Z-pinch).



Принцип Z-pinch эффекта

# История ЛИТ

Сопутствующие проблемы этой технологии привели к разработке Б. М. Ковальчуком микросекундных ЛИТ (LPT – Liner Pulsed Transformer), что стало первым решающим шагом на пути развития этой новой технологии.

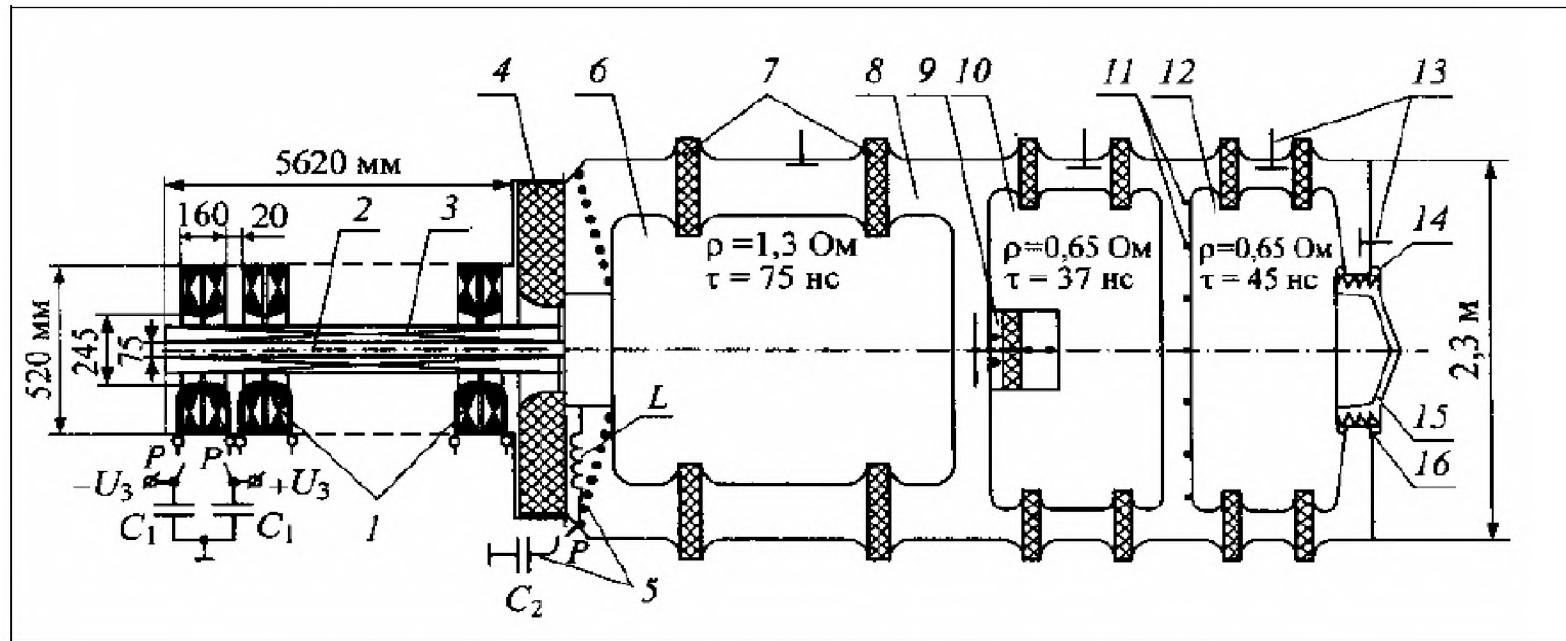


Схема установки СНОП-3 (ИСЭ СО РАН, г. Томск)

1 – 24 индуктора, 2 – внутренний токопровод, 3 – глицериново-пленочная изоляция, 4 – проходной изолятор глицерин/вода, 5 – разделительные индуктивность и конденсатор схемы размагничивания сердечника, 6- промежуточный ЕНЭ, 7 – опорные изоляторы, 8 – водяная изоляция, 9 – управляемый многоканальный коммутатор, 10 – ФЛ, 11 – неуправляемый многоканальный коммутатор, 12 – передающая линия, 13 – емкостные датчики напряжения, 14 – датчик тока, 15 – блок нагрузки, 16 – вакуумный изолятор

# История ЛИТ

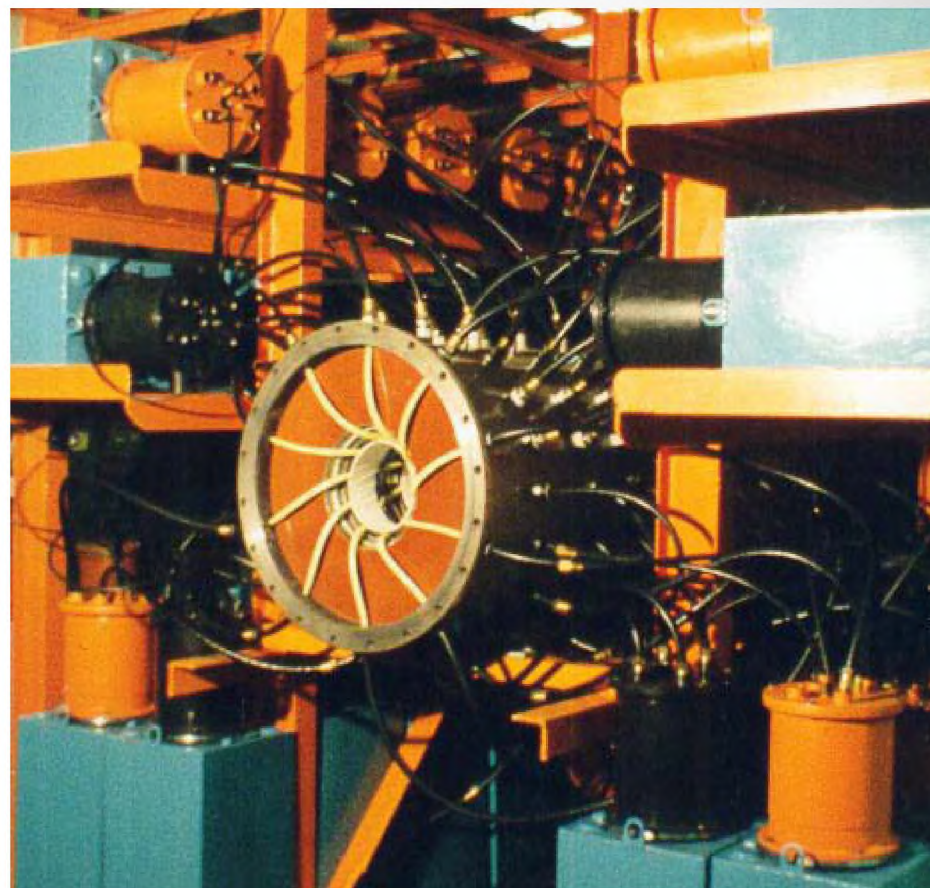
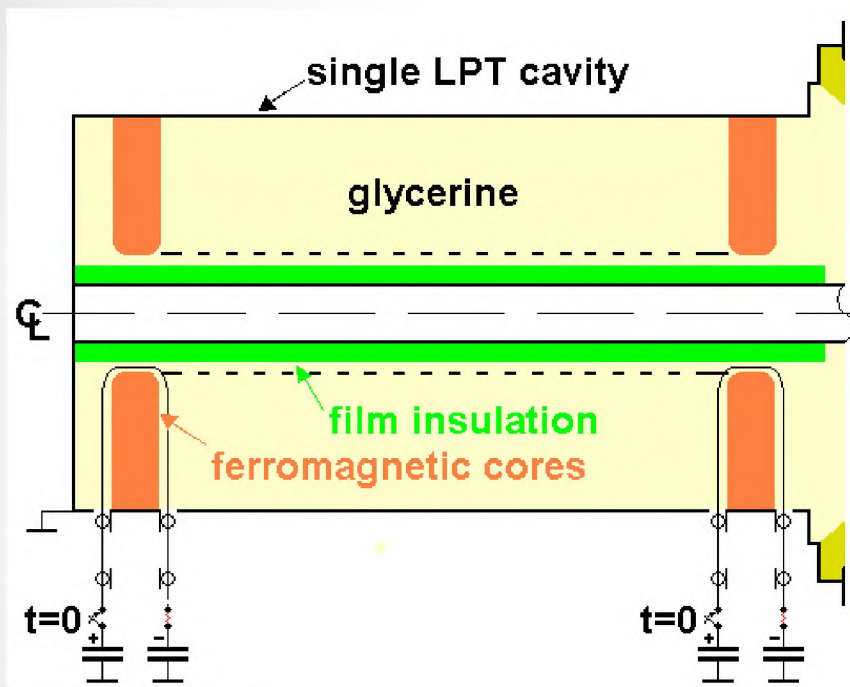


Схема ЛИТ установки СНОПИ-3 (ИСЭ СО РАН, г. Томск)\*

Такая схема давала возможность получить импульсы длительностью порядка микросекунд

\*A.A. Kim, M.G. Mazarakis The Story of the LTD Development // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2020

# История ЛИТ

$t \rightarrow \text{нс}$ , нужно  $L \downarrow$   $C \downarrow$

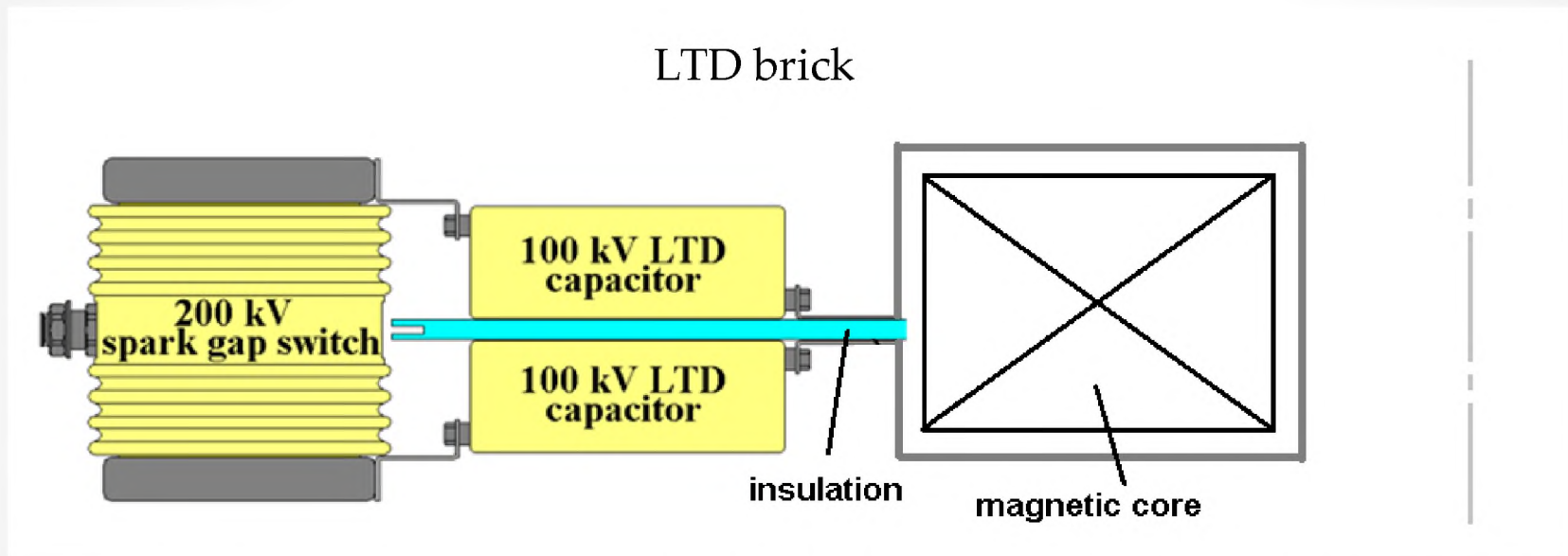


Схема «быстрого» конденсаторного-коммутаторного блока (brick – «кирпич»), использующего конденсаторы General Atomics\*.

Конденсаторы заряжаются разнополярно.

\*A.A. Kim, M.G. Mazarakis The Story of the LTD Development // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2020

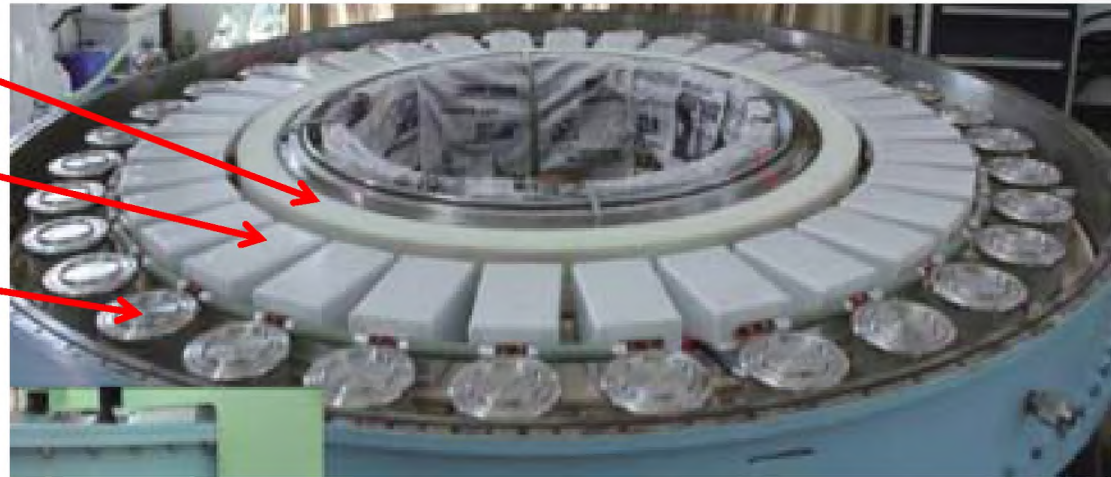
# История ЛИТ

- ЛТД – Линейный трансформаторный драйвер  
LTD – Liner transformer driver

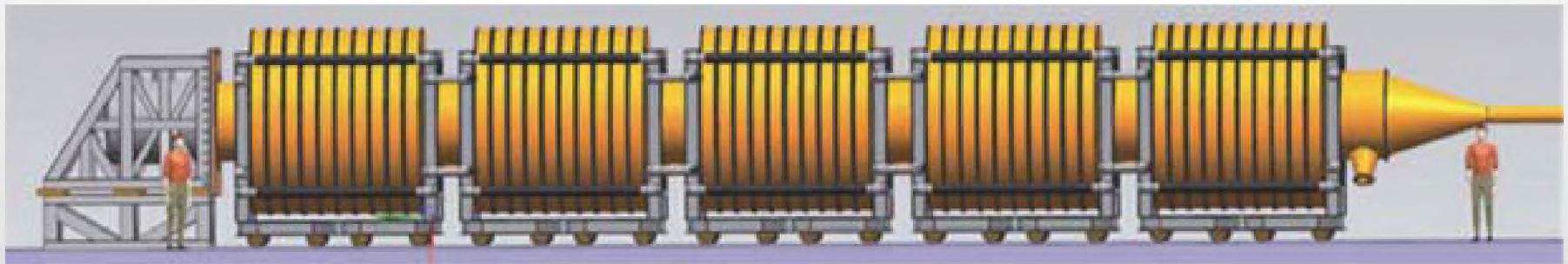
магнитопровод

конденсатор

коммутатор



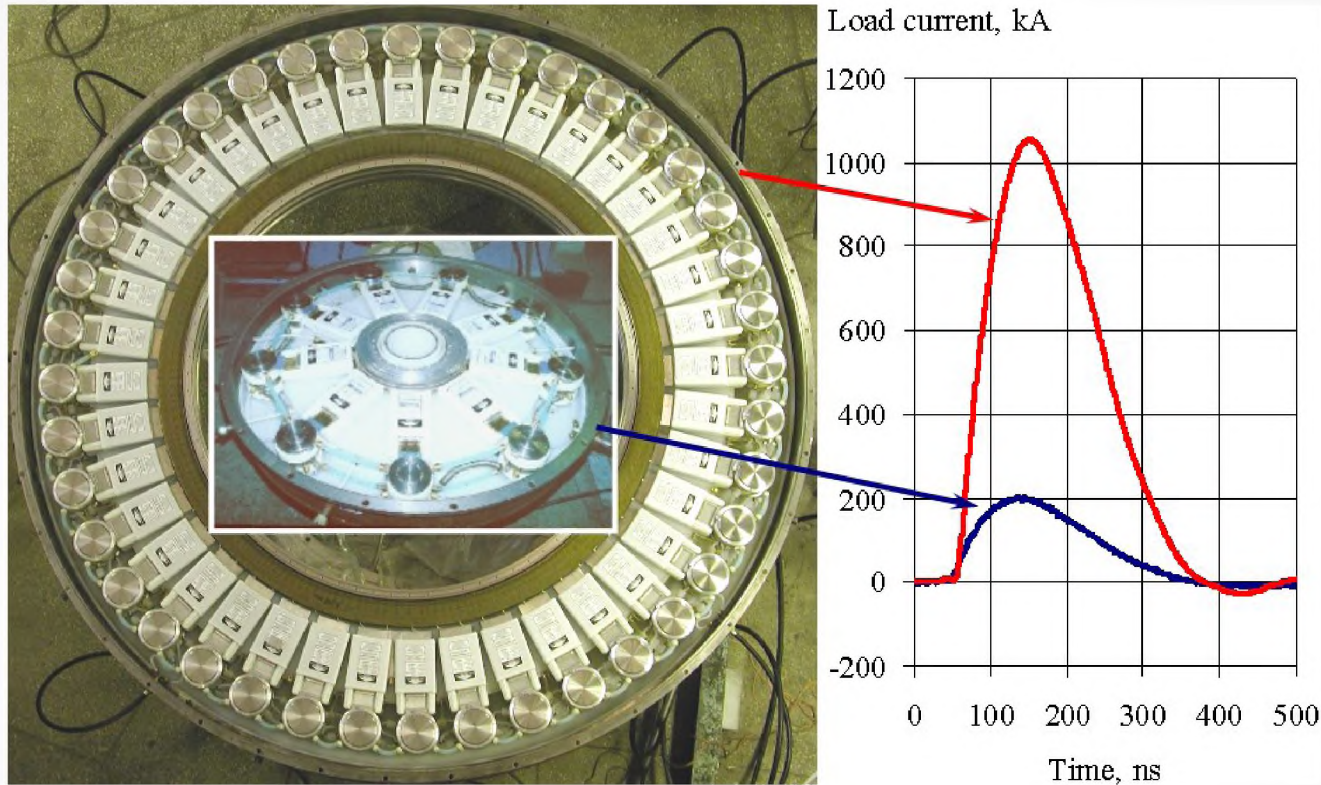
ЛТД – сборка установки М50



Концепция модуля М-50 для исследования термоядерного синтеза\*.

- \*L. Chen *et al.*, "Development of a fusion-oriented pulsed power module," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 22, Mar. 2019, Art. no. 030401, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.030401.

# История ЛИТ



Фотографии и токи нагрузки самого первого быстрого ЛТД на 200 кА и ЛТД с самым большим током 1 МА. Диаметр трансформатора на 1-МА – 3 м\*.

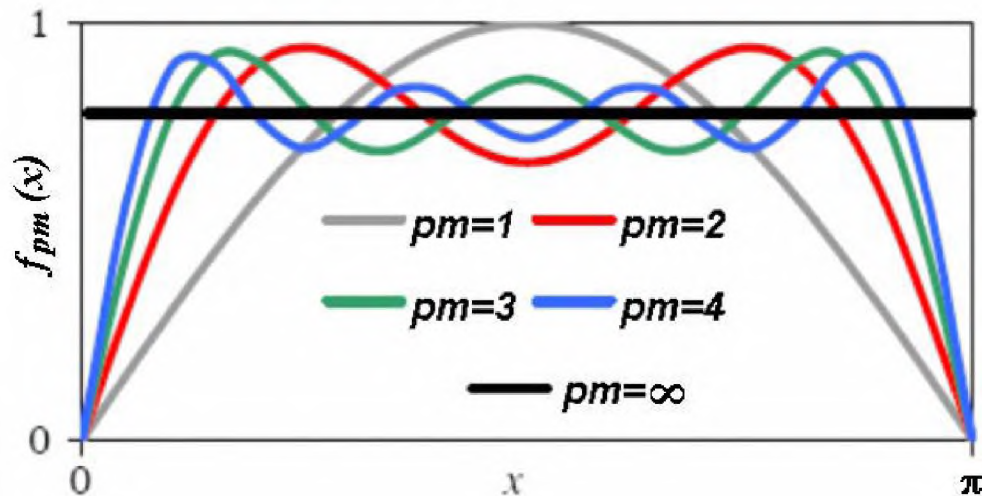
Ток в нагрузке имеет колоколообразную (синусоидальную) форму.

\*A.A. Kim, M.G. Mazarakis The Story of the LTD Development // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2020

# История ЛИТ

Чтобы приблизить форму к прямоугольной, появилась идея сформировать импульс наложением нескольких синусоидальных сигналов друг на друга по аналогии суперпозиции по теореме Фурье:

$$f_{pm}(x) = \sum_{p=1}^{pm} \frac{\sin(2p-1)x}{(2p-1)}$$





# История ЛИТ

Так технология ЛИТ получила дальнейшее развитие для генерации быстро нарастающих выходных импульсов с плоской или трапецевидной (восходящей или нисходящей) вершиной. (ЛТД прямоугольных импульсов – Square Pulse LTDs\*)

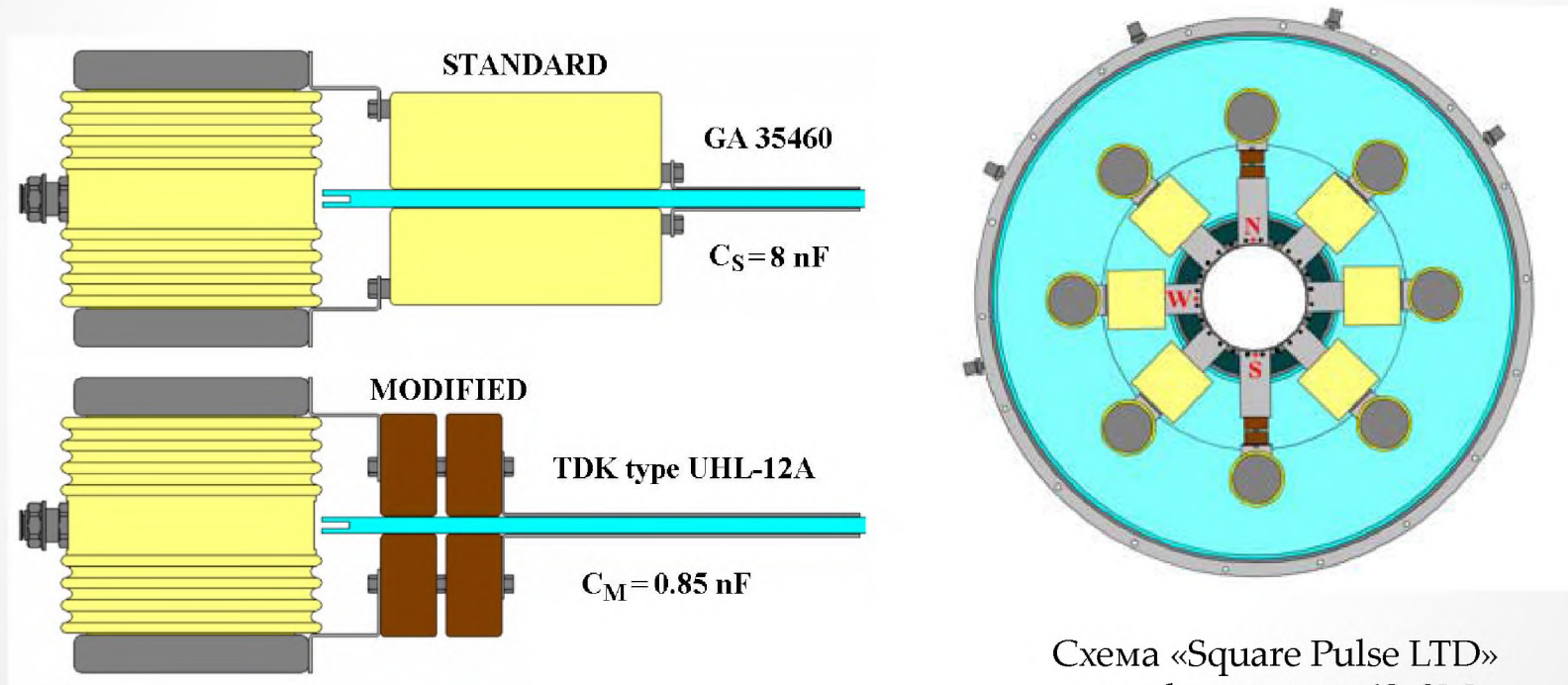


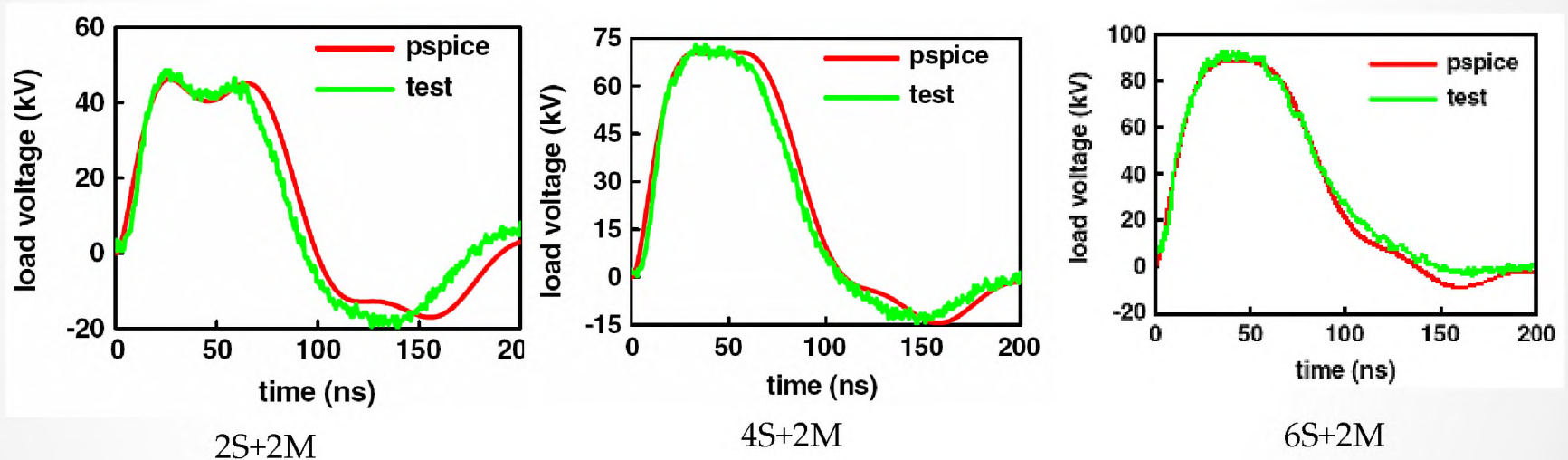
Схема стандартного и модифицированного конденсаторного-коммутаторного блока

Схема «Square Pulse LTD» в конфигурации 6S+2M.

\*A.A. Kim, M.G. Mazarakis The Story of the LTD Development // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2020

# История ЛИТ

Так технология ЛИТ получила дальнейшее развитие для генерации быстро нарастающих выходных импульсов с плоской или трапецевидной (восходящей или нисходящей) вершиной. (ЛТД прямоугольных импульсов – Square Pulse LTDs\*)

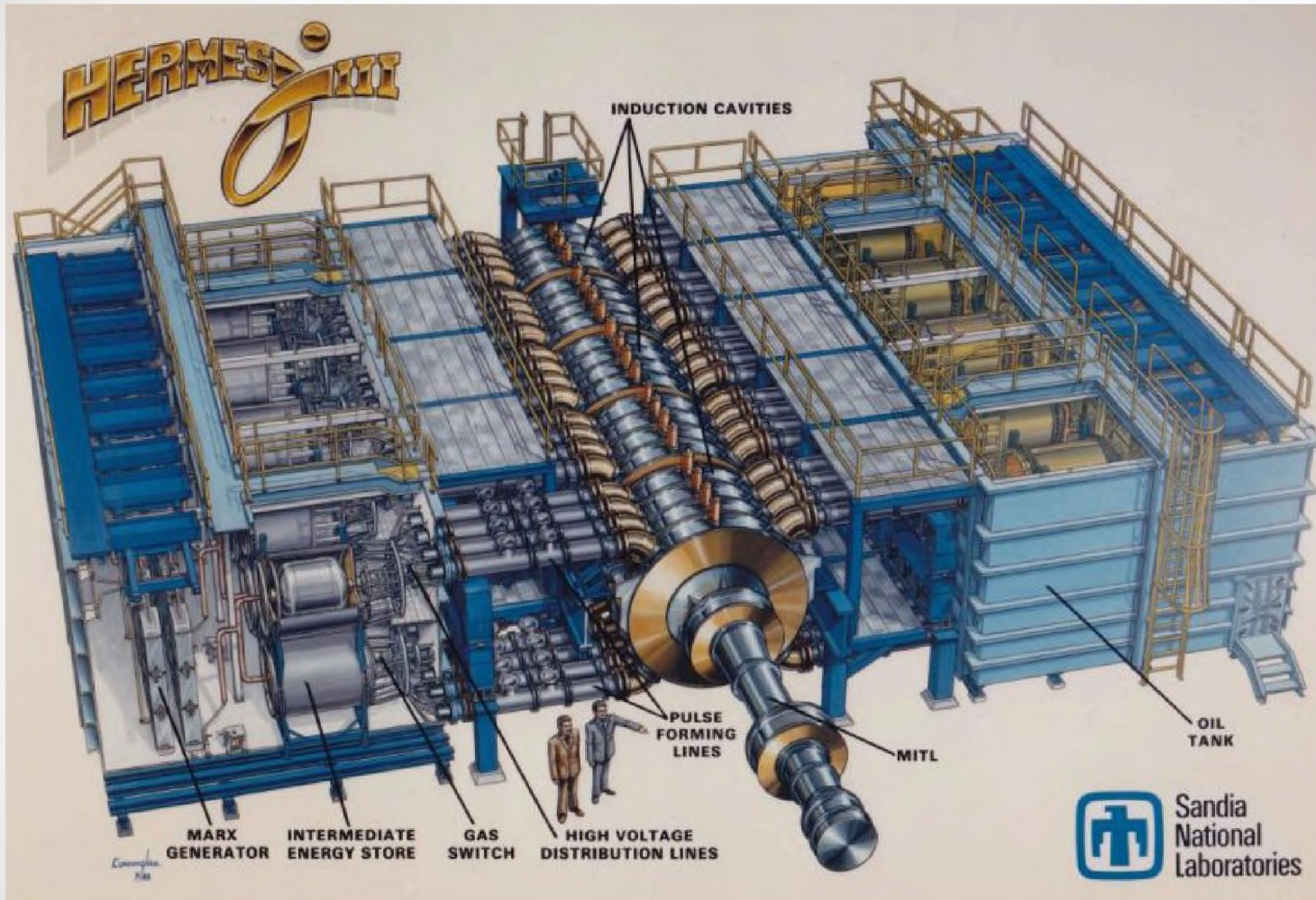


\*A.A. Kim, M.G. Mazarakis The Story of the LTD Development // IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 48, NO. 4, APRIL 2020

# Примеры

## Гермес-3 (Hermes III)

20 секций ЛИТ



$$U_{\text{ВЫХ}} = 20 \text{ МВ}$$
$$I_{\text{ВЫХ}} = \text{до } 800 \text{ кА}$$
$$t_{\text{ИМП}} = 40 \text{ нс}$$

Ускоритель предназначен для радиационных испытаний и обеспечивает мощность дозы  $5 \cdot 10^{12}$  Р/с в цилиндре с площадью основания  $500 \text{ см}^2$ .

# Примеры

## Гермес-3 (Hermes III)



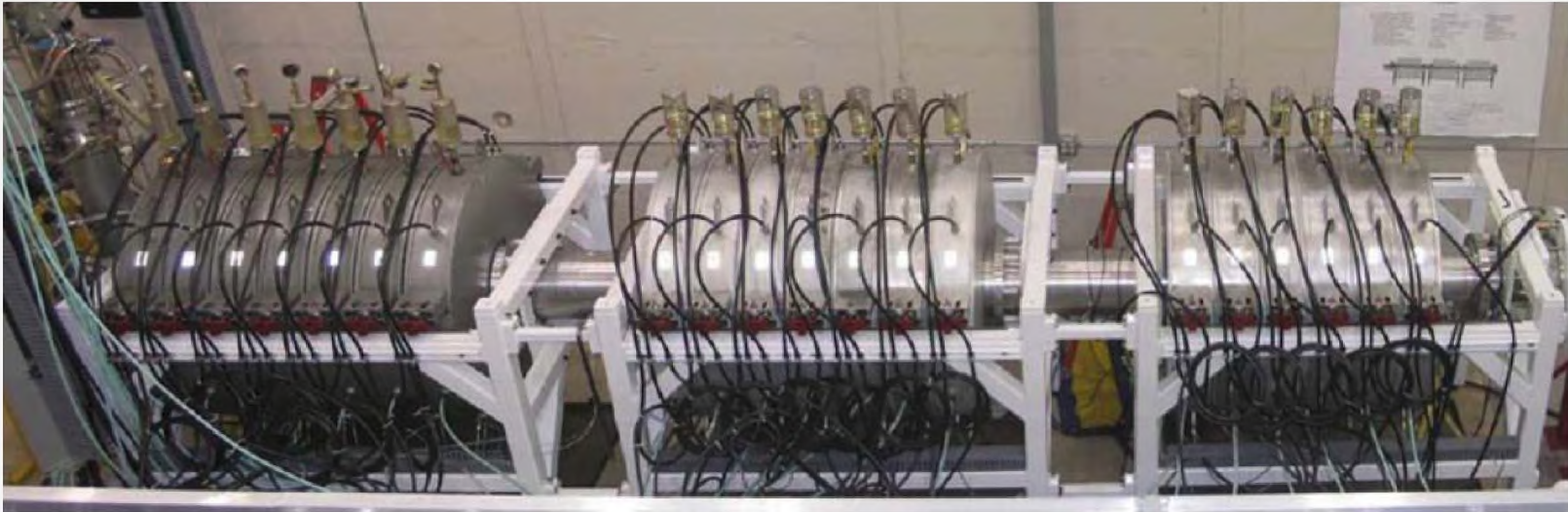
Первый интегрированный тест ускорительного диода проведен 26 февраля 1988 г.

Самый мощный в мире источник гамма-излучения — перед следующим выстрелом его обслуживают технические специалисты. «Гермес» постоянно находится в «режиме теплого резерва» для немедленного тестирования компонентов.

# Примеры

## URSA Minor – «Малая Медведица»

21 секция ЛИТ (разработаны в ИСЭ СО РАН)



Малый ускоритель электронов URSA в лаборатории Sandia\*

420 конденсаторов (по 20 в каждой секции),

210 ключей (по 10 в каждой секции)

Длина 7 метров.

Диаметр 1,3 метра.

$U_{\text{вых}} = \text{от } 0,8 \text{ до } 2,4 \text{ МВ}$

Ускоритель предназначен для получения интенсивного рентгеновского излучения для радиографических исследований.

● \*<https://www.sandia.gov/pulsed-power/research-facilities/ursa-minor/>

# Примеры

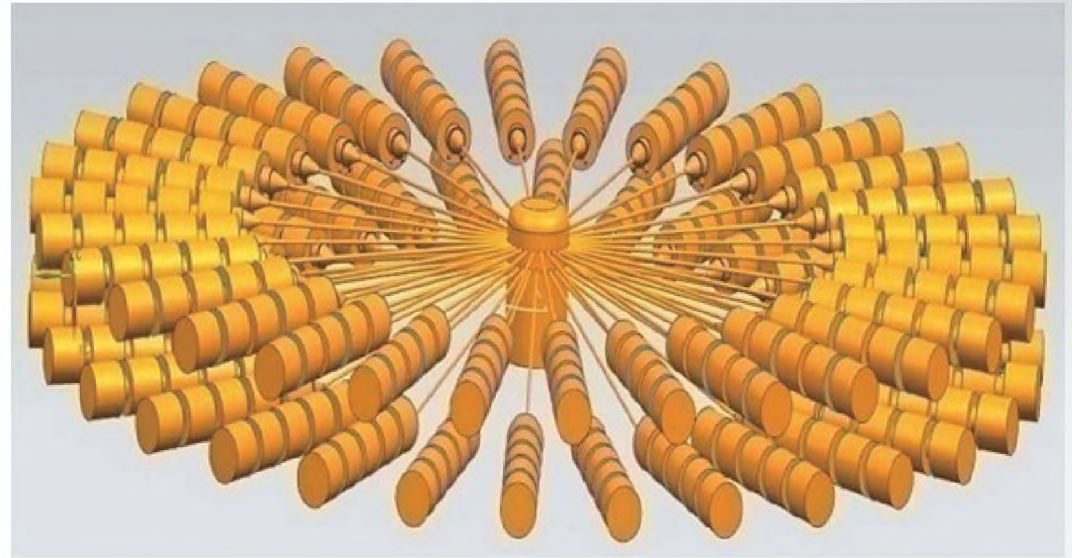
## URSA Minor – «Малая Медведица»



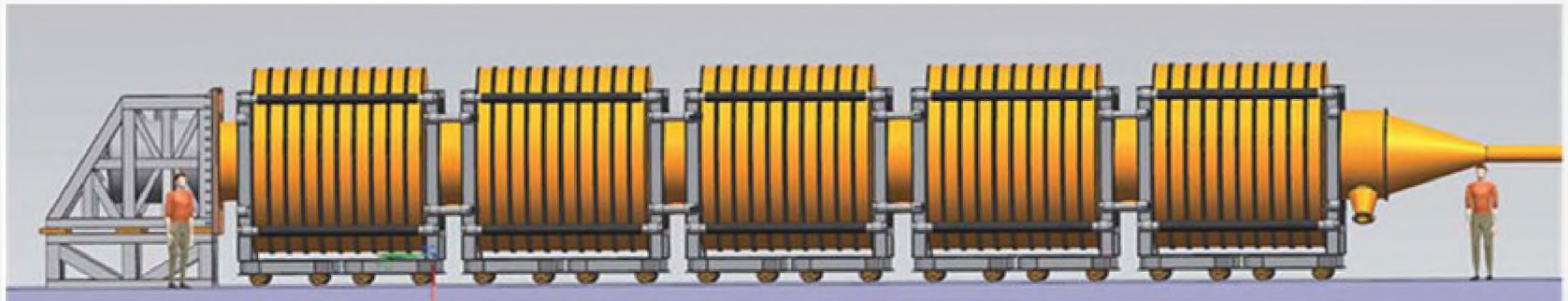
**Малая Медведица** начиналась как система ЛТД с 7 резонаторами, построенная ИСЭ, Томск, и тестировалась в SNL с 2005 по 2009 год (7 крайних левых резонаторов на фотографии). В 2009–2011 годах SNL и ООО «Технологии национальной безопасности» (NSTEc) совместно изготовили и закупили еще 14 резонаторов, увеличив напряжение системы с 800 тысяч вольт до 2,4 миллиона вольт.

$I = 50 \text{ MA}$  на 1 модуль

# Примеры



Концепция установки для исследования термоядерного синтеза на основе ЛТД\*



Концепция модуля М-50 для исследования термоядерного синтеза\*.

Планируется 60 модулей подключённых параллельно  
В каждом модуле 50 ЛТД  
Диаметр и высота 65 м и 10 м соответственно.

- \*L. Chen *et al.*, "Development of a fusion-oriented pulsed power module," *Phys. Rev. Accel. Beams*, vol. 22, Mar. 2019, Art. no. 030401, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.030401.

# Примеры

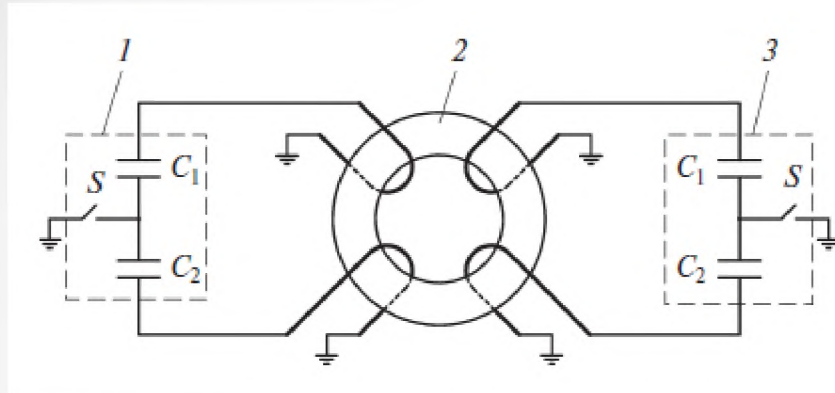
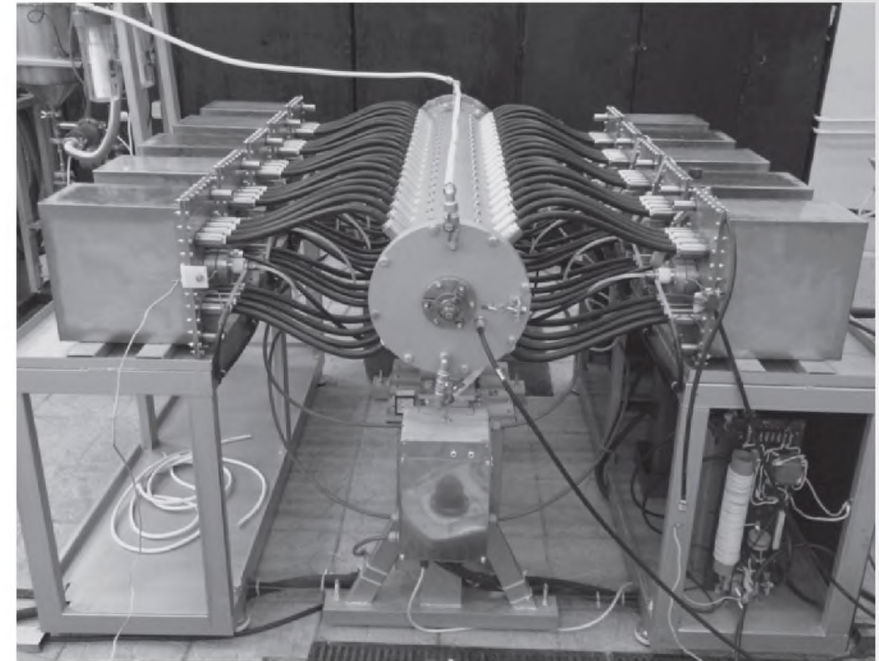


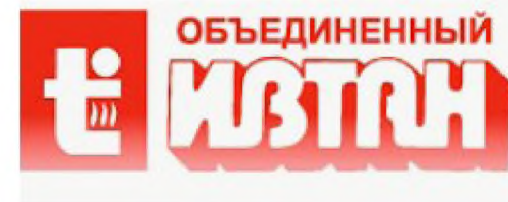
Схема подключения первичного контура  
1, 3 – модули емкостного накопителя,  
2 – индуктор.



Ускоритель на ЛИТ в ОИВТ РАН\*

ударная емкость – 17.5 нФ,  
эквивалентная индуктивность – 2 мкГн,  
активное сопротивление – 3.2 Ом.

Используется для исследования в области терапии онкологических заболеваний

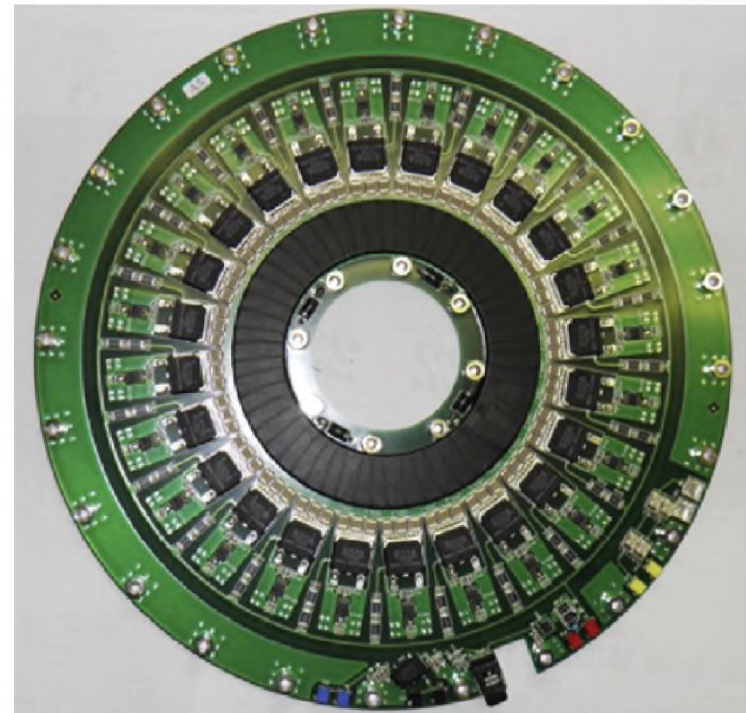
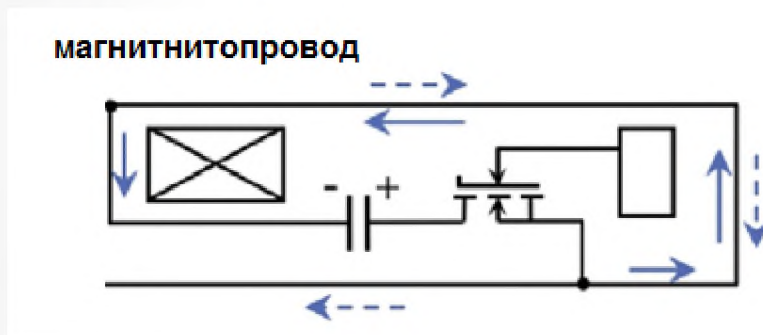
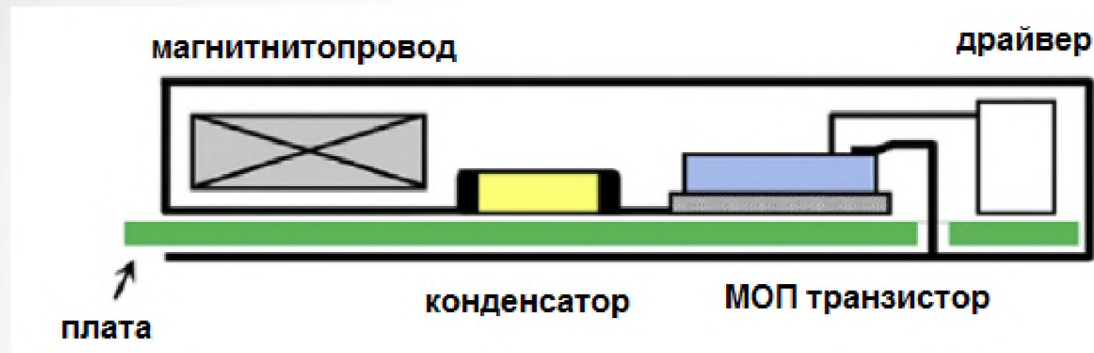


\* Ю. А. Быков и др., "Субмикросекундный линейный импульсный трансформатор на напряжение 800 кВ с модульной малоиндуктивной системой первичного электропитания," Ядерная физика и инжиниринг, 2015, том 6, № 11–12, с. 579–586, DOI: 10.1134/S2079562915060068



# Примеры

ЛИТ на полупроводниках\*



\*W. Jiang Review of solid-state linear transformer driver technology / Matter and Radiation at Extremes 3 (2018)

• <https://doi.org/10.1016/j.mre.2018.02.001>

# Примеры

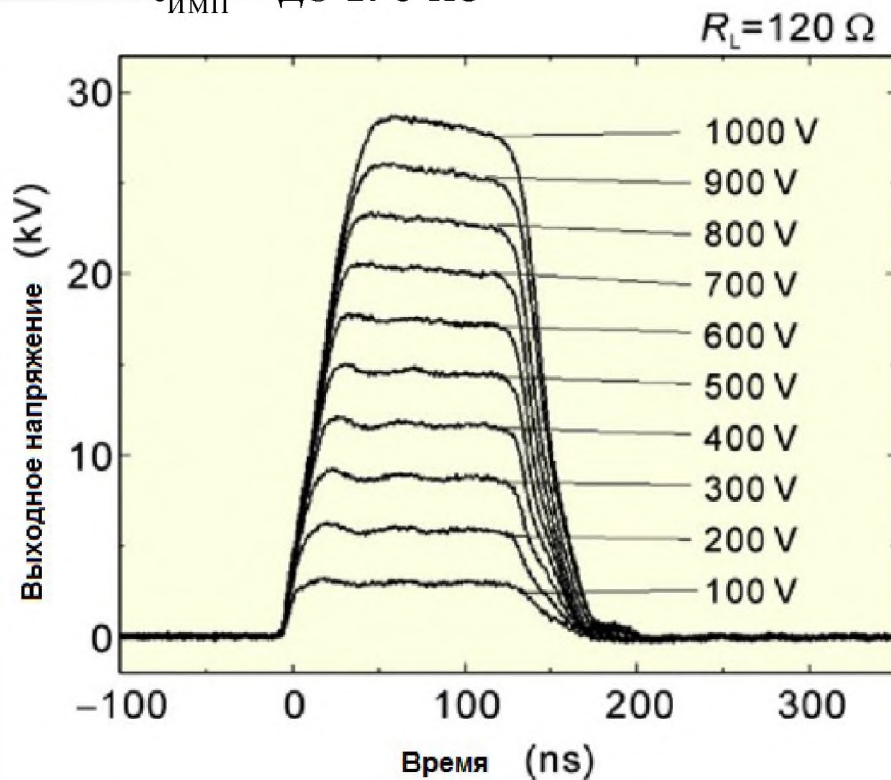
## ЛИТ на полупроводниках\*

30 секций ЛИТ

$$U_{\text{ВЫХ}} = 29 \text{ кВ}$$

$$I_{\text{ВЫХ}} = \text{до } 240 \text{ А}$$

$$t_{\text{ИМП}} = \text{до } 170 \text{ нс}$$



\*W. Jiang Review of solid-state linear transformer driver technology / Matter and Radiation at Extremes 3 (2018)

● <https://doi.org/10.1016/j.mre.2018.02.001>

# Соотношения

Проницаемость сердечника, ток и количество витков определяют точку насыщения.

$$V = N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V \cdot dt = N \cdot d\Phi$$

$$\Phi_{\text{sat}} = B_{\text{sat}} \cdot A$$

Вольт-секунды эквивалентны  
ампер-генри  $V_L \Delta t = L \Delta i$

$$V \cdot t_{\text{умп}} = B \cdot A$$

