

# **ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР КАК КЛЮЧЕВОЙ ЭЛЕМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

**Докладчик: Вольный В.С., ст.преп. каф. ГВИЭ, НИУ МЭИ**

**18.10.2023**

# 1. Проблемы эксплуатации традиционных силовых ТНЧ при интеграции РИЭ в распределительные сети СН и НН

Возможности регулирования электрических величин распределительного силового трансформатора :

- Значение напряжения: ПБВ ( $\pm 5\% U_1$ ), РПН ( $\pm 10\% U_1$ )
- Значение тока: ПБВ ( $\pm 5\% I_2$ ), РПН ( $\pm 10\% U_1$ )
- Значение активной мощности:  $P_1 \approx P_2$
- Значение реактивной мощности:  $Q_1 \approx Q_2$
- Значение частоты:  $f_1 = f_2$

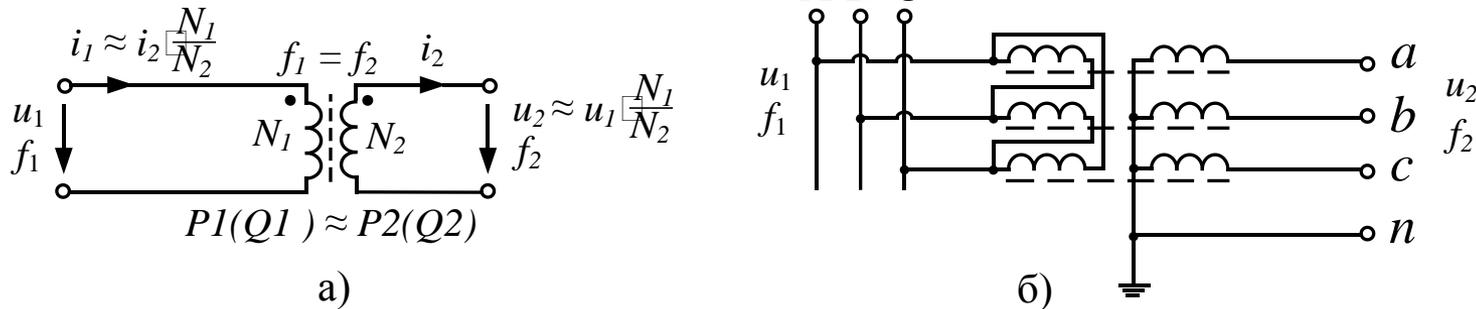


Рис.1. Силовой трансформатор:

а - однофазная схема замещения; б –трехфазного назначения 6..35/0,4 кВ.

**Следствие: традиционные силовые распределительные трансформаторы имеют незначительные возможности регулирования!!!**

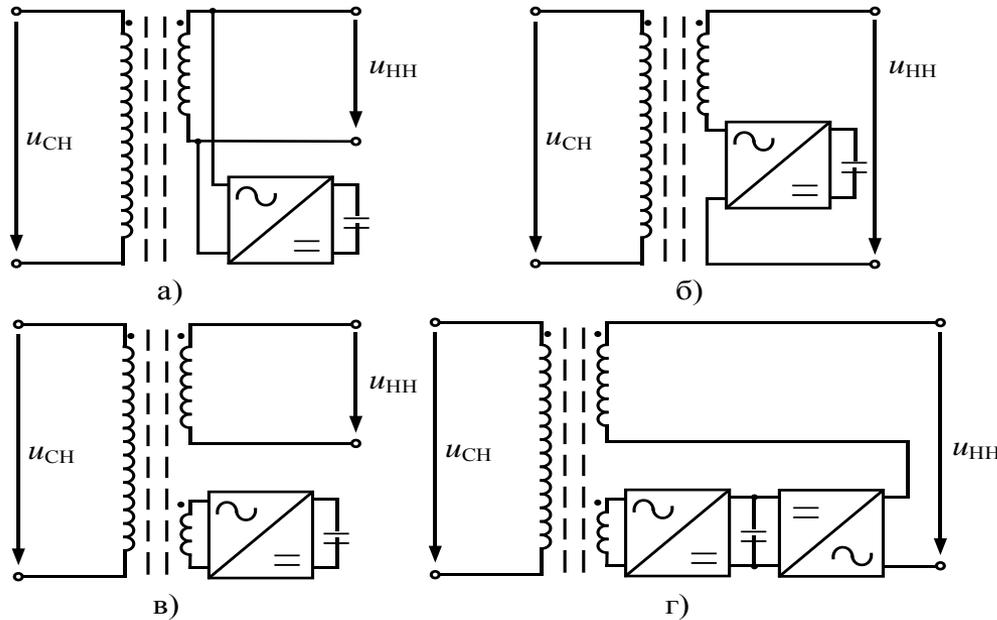
# 1. Проблемы эксплуатации традиционных силовых трансформаторов низкой частоты при интеграции РИЭ в распределительные сети среднего и низкого напряжений

Отраслевые стандарты определяют необходимое направление потока для трансформаторов.

- **IEEE C57.12.00-2015, раздел 4.18:** силовые трансформаторы должны быть рассчитаны на понижающую работу, если не указано иное, например, повышающие трансформаторы генератора или межсистемные трансформаторы, которые должны быть предназначены для повышающих или понижающих режимов. Согласно стандарту
- **IEC 60076-1-2011:** поток мощности должен быть указан во время спецификации трансформатора. Таким образом, многие устаревшие трансформаторы были разработаны для передачи мощности только в одном направлении.
- **ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93), п.п.3.3.5:** направление передачи мощности упоминается в п.п.3.3.5 трансформаторы обратимы, за исключением контекста о направлении потока активной мощности, т.е. **либо трансформаторы полностью обратимы (могут передавать номинальную мощность в двух направлениях), либо этот вопрос не рассматривался.**

При этом максимальное значение ОПМ для каждого ТНЧ и ТНЧ с РПН является индивидуальной характеристикой и может быть составлять: для ТНЧ 6..20/0,4 кВ– 25%, для ТНЧ 35..220/6..20 кВ с РПН – 30 % от номинальной мощности ТНЧ, что требует предварительного расчёта.

## 2. Гибридные распределительные трансформаторы



**Рис.2. Варианты конфигурации реализации ГРТ:**

а – шунтовое соединение; б - последовательное соединение СЭП с обмоткой на стороне НН;

в – шунтовое соединение (на отдельной обмотке НН); г – встречное соединение шунта и последовательно СЭП (максимальную гибкость, так как шина постоянного тока последовательного каскада может обмениваться активной мощностью с сетью посредством шунтирующего каскада.)

Таким образом, произвольные (в пределах номинальных характеристик преобразователя) напряжения могут подаваться последовательно к напряжению обмотки НН ТНЧ для обеспечения фильтрации гармоник, коррекции коэффициента мощности, контроля фликера и т.д., а СЭП может обрабатывать лишь сравнительно небольшую долю общей мощности ТНЧ (не более 20 %).

### 3. Твердотельные трансформаторы

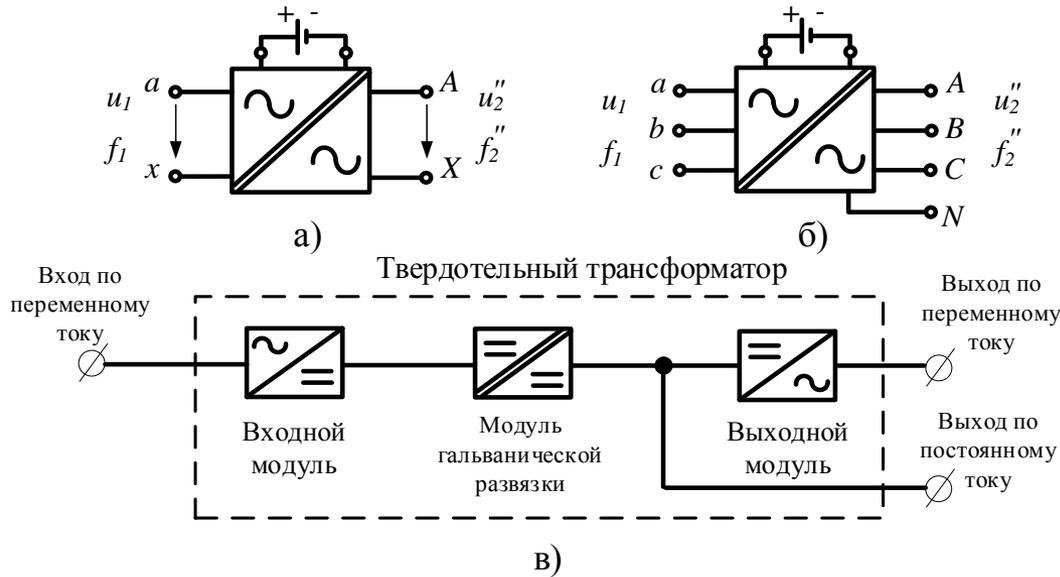


Рис.3. Концепция твердотельного трансформатора:

а – однофазного назначения; б – трехфазного назначения; в – обобщенная структура ТТТ

Дальнейшее усовершенствование ТТТ, в части расширения его функциональных возможностей и рабочих диапазонов (ток, напряжение, частота), повышения технической надежности и т.д., позволило на его основе сформировать **«умный» трансформатор, обладающим полной управляемостью.**

Для реализации **полной управляемости** общую структуру ТТТ на разделяют на три основных модуля: **входной, гальванической развязки и выходной.** Каждый из представленных модулей может функционировать в рамках заданных алгоритмах, что позволяет распределить и оптимизировать решаемую задачу управления на трех уровнях. Таким образом, система управления ТТТ позволяет полностью контролировать, регулировать и управлять режимами ТТТ

### 3. Твердотельные трансформаторы

В настоящее время, **не существует регламентированной классификации ТТТ**. В связи с этим, **используются различные подходы к классификации ТТТ**. Наиболее распространенной является классификация ТТТ на основе пяти классов:

- 1) **матричный тип;**
- 2) **гальваническая развязка со стороны сети СН;**
- 3) **гальваническая развязка со стороны сети НН;**
- 4) **изолированные модули многоуровневого СЭП;**
- 5) **одноточечный подход.**

Данная классификация является актуальной только для конструкторов СЭП и ТПЧ в составе ТТТ, так как практической значимости ТТТ имеет косвенный характер. Однако, **более наглядной является классификация на основе топологий ТТТ**, объединяющей разнообразие существующий концепций построения ТТТ, в рамках следующей таксономии ТТТ:

- 1) **классификация топологий ТТТ;**
- 2) **конструкция МГР;**
- 3) **определение типа полупроводника и схемы СЭП ТТТ;**
- 4) **назначение ТТТ.**

### 3. Твердотельные трансформаторы

Таблица 1. Функциональные возможности различных топологий ТТТ

Параметр	Количество ступеней преобразования тока			
	Одна	Две		Три
		со ЗПТ СН	со ЗПТ НН	
Входная коррекция коэффициента мощности	–	+	+	+
Наличие звена постоянного тока	–	+	+	+
Гальваническая развязка	+	+	+	+
Управление РИЭ	–	+	+	+
Целесообразность	+/-	–	–	+
Стоимость и масса	+++	++	++	+
Регулирование входного напряжения	–	+	+	++
Компенсация реактивной мощности	–	+	+	+
Реализация схемы	+	+	+	+
Возможность поддержания бесперебойного питания	–	–	–	+
Улучшение качества электроэнергии	–	+	+	+
Ограничение входного тока	–	+	+	+

### 3. Твердотельные трансформаторы. Конструкция МГР

Ключевым элементом ТТТ, осуществляющим передачу электроэнергии между сетями различных уровней напряжения, является трансформатор средней или высокой частоты (ТСВЧ), который может иметь в качестве рабочей частоты из среднего (0,5÷5 кГц) или высокого (5÷20 кГц) диапазона частот. Дальнейшее повышение уровня рабочей частоты ТСВЧ, т.е. выше 20 кГц, способствует существенному повышению уровня коммутационных потерь на электронных ключах СЭП, а теплоотвод, необходимый для обеспечения температуры перехода полупроводников, становится объемным и равен 100 °С.

Основные проблемы ТСВЧ связаны с дополнительными потерями из-за вихревых токов в магнитопроводе, избыточными потерями в обмотках вследствие усиленного скин-эффекта и эффекта близости, а также оценке паразитных элементов.

1 – радиатор; 2 – первичная обмотка, выполненная из прямоугольной медной фольги или литцендрата; 3 – первичная обмотка, выполненная из прямоугольной медной фольги или литцендрата; 4 – изоляционный промежуток, зависящий от требований к изоляции и индуктивности рассеяния; 5 – полимерный теплопроводный слой, использующийся для отвода тепла к радиаторам; 6 – разрезные ленточные сердечники броневое типа, выполненные из нанокристаллического материала (например, Vitroperm500F); 7 – пакеты пластин.

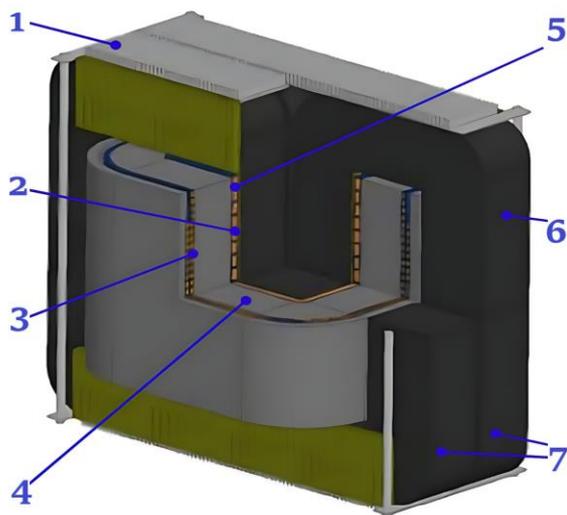


Рис.4. Конструкция ТСВЧ  
броневое типа

### 3. Твердотельные трансформаторы

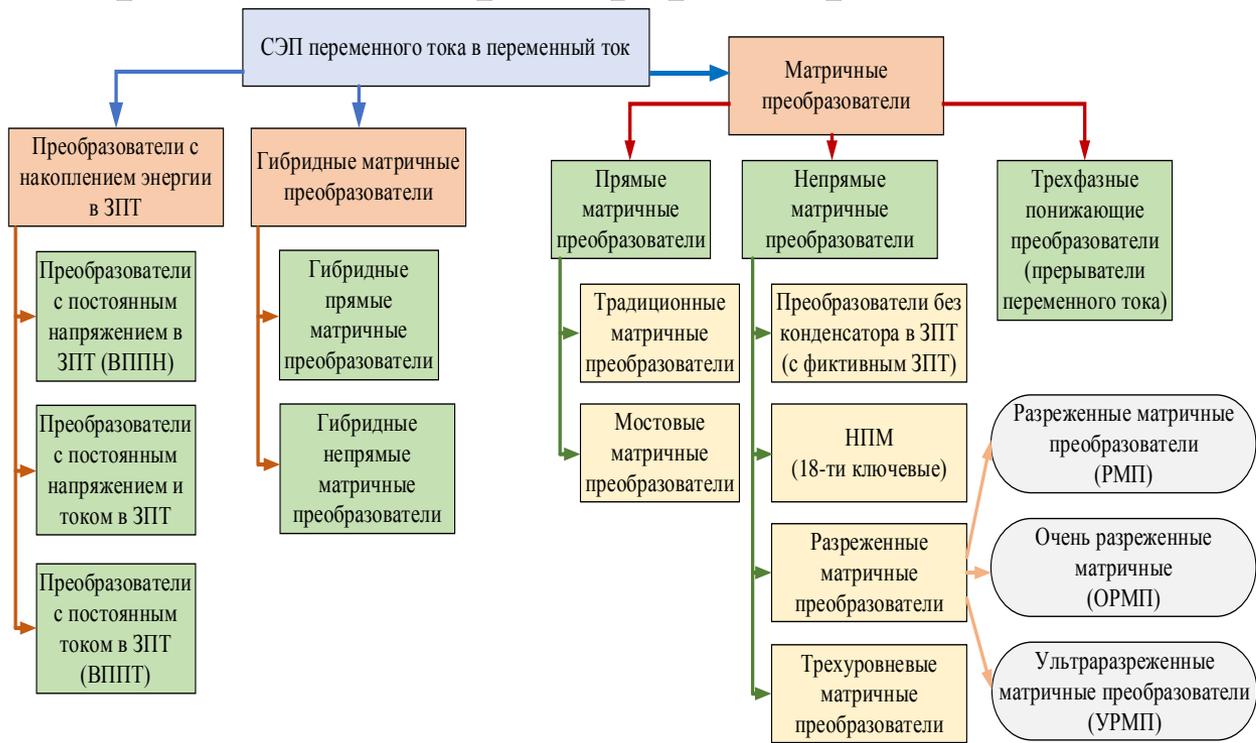


Рис.5. Классификация трехфазных СЭП

Показатель	ВПНН	ВПТТ	ТМП	НМП
№* транзисторов	12	12	18	18
№ диодов	12	12	18	18
№ драйверов изолированного затвора	8	8	9	9
№ ШИМ-сигналов	12	12	18	12
№ устройств, задействованных в цикле работы	4	8	4	6
Минимальное № датчиков тока	4	3	2	2
Минимальное № датчиков напряжения	4	6	3	3
Промежуточный накопитель	$C_{DC}$	$L_{DC}$	–	–
Дополнительная схема защиты	$>U_{вх}$	$>U_{вх}$	$0,86U_{вх}$	$0,86U_{вх}$

Таблица 2. Основные характеристики базовых топологий СЭП

### 3. Твердотельные трансформаторы

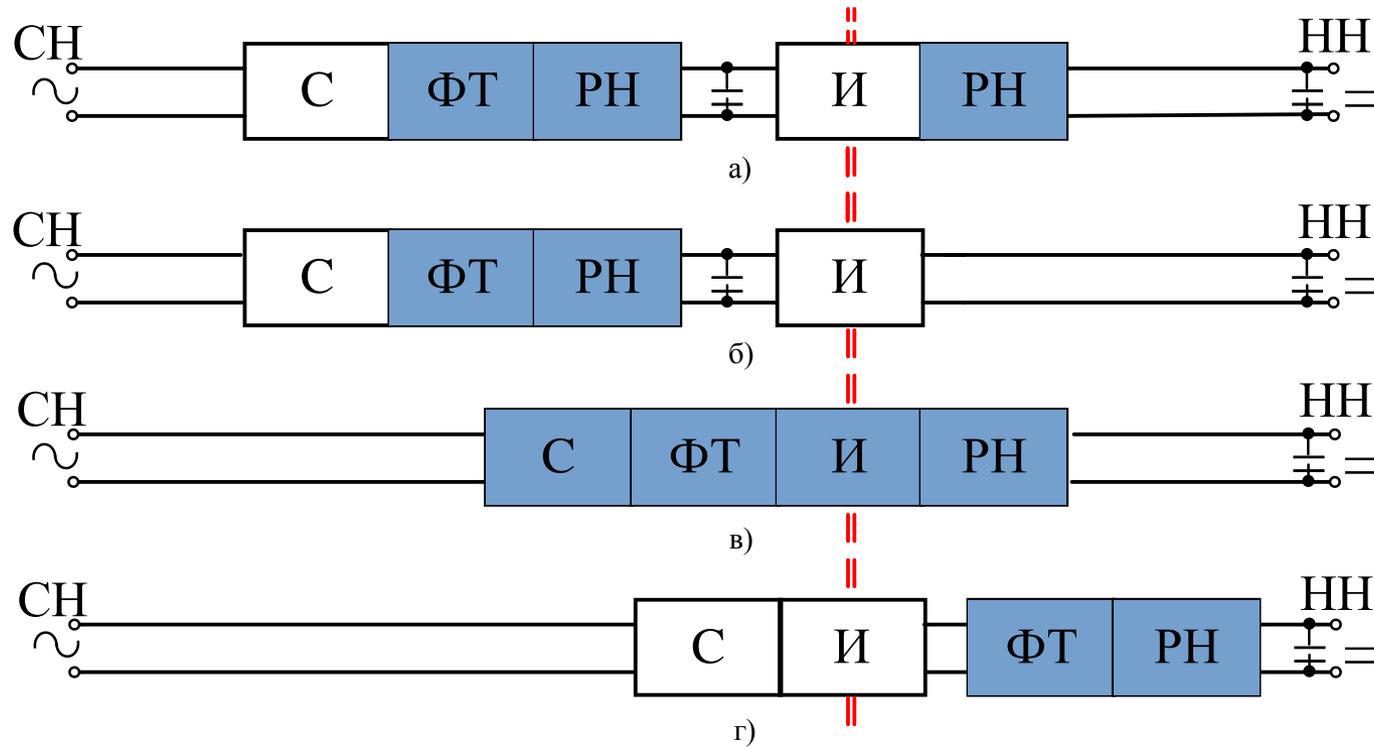


Рис.6. Разделение и последовательность задач МГР ТТТ:  
а – полная; б – ИССН; в – объединенная; г – ИСНН

«С» – функция свертки переменного напряжения в модуль его действующего значения.

«ФТ» – функция формирования входного тока.

«И» – функция гальванической развязки и формирования напряжения.

«РН» – функция регулирования выходного напряжения.

## 4. Сравнительный анализ применимости ГТР и ТТТ

Применение СЭП из переменного тока в переменный ток в распределительной сети сложности, связанные с эффективностью их работы, так как при повышении уровня запирающего напряжения повышается как стоимость используемых в них полупроводниковых ключей, так и их стоимость. Использование в составе ТТТ ТСВЧ может повысить эффективность применения СЭП, если рассматривать их использование совместно с ТНЧ, т.е. в ГРТ, но дополнительные потери ступеней преобразования приводят к снижению общей эффективности таких решения. а сравнение размеров, потерь, стоимости и управляемости ТНЧ, ТНЧ с РПН, ГРТ и ТТТ.

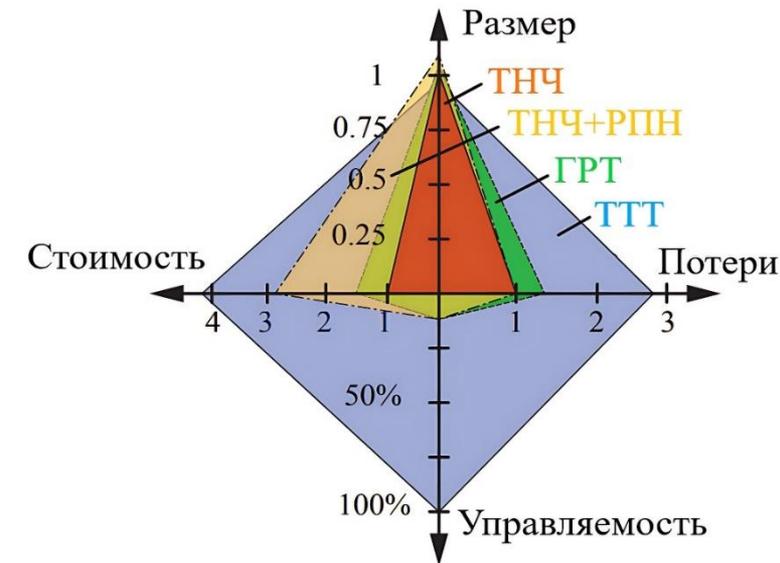


Рис. 7. Сравнение показателей ТНЧ, ТНЧ с РПН, ГРТ и ТТТ применительно к распределительным сетям переменного

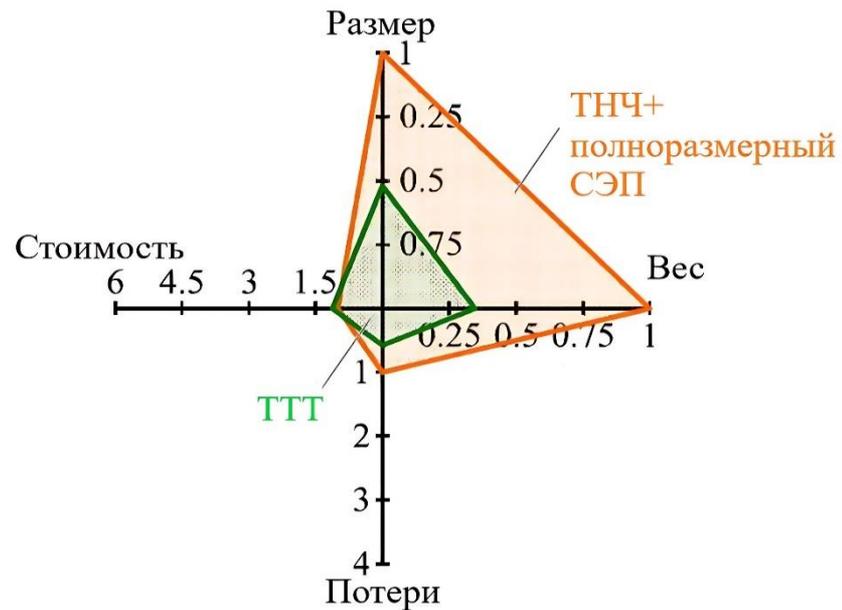


Рис. 8. Сравнение показателей ТНЧ с полноразмерным СЭП и ТТТ в распределительных сетях постоянного тока

## 5. Основные выводы

- 1) в условиях массовой интеграции РИЭ возникает необходимость в повышении управляемости силовых трансформаторов, которая может быть реализована либо на концепции модернизации существующих ТНЧ вследствие подключения к ним СЭП, т.е. ГРТ, либо на концепции ТТТ;
- 2) на данном этапе развития ТТТ не может стать полноценной заменой ТНЧ применительно в распределительных сетях только переменного тока, так как имеет значительно худшие показатели по стоимости и потерям, поэтому наиболее оптимальным вариантом при формировании только распределительной сети постоянного тока, так и гибридной сети (50% постоянного тока и 50% переменного тока);
- 3) ТТТ исключает необходимость в традиционных способах его защиты (реле защиты, предохранители и т.д.);
- 4) использование ТСВЧ в составе МГР ТТТ позволяет существенным образом снизить масса-габаритные показатели всего ТТТ;
- 5) оптимальным в составе ТТТ использовать топологии матричных преобразователей, на основе SiC и его политипа 4H-SiC, так как такие решения упрощают построения СЭП;
- 6) реализация структуры МГР связана с системой организации управления ТТТ: МГР с гальванической развязкой постоянно-переменного тока используется в концепциях ТТТ на основе ИСНН, а МГР с гальванической развязкой на постоянном токе – ИССН.;
- 7) преимущественно МГР имеет структуру, реализованную на ПРП, так как при она обеспечивает мягкие переключения в широком диапазоне значений.

# **Благодарю за внимание!**

**Докладчик: Вольный Владислав Станиславович**

**Телефон: +7 985 810 35-50**

**Почта: [volnyuvs@yandex.ru](mailto:volnyuvs@yandex.ru)**