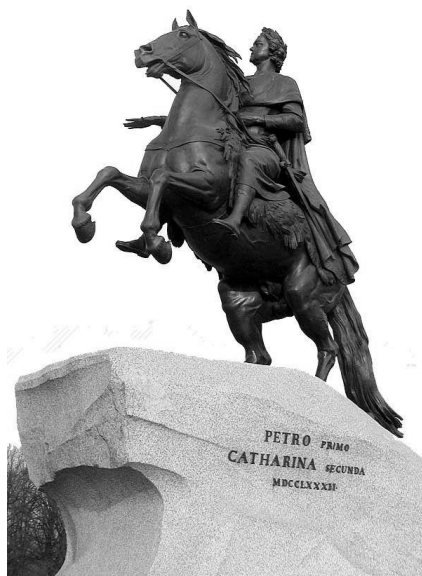


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ  
( ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» )

**Инновационные решения  
и современные технологии эксплуатации  
трансформаторного оборудования  
высокого напряжения**

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**  
научно-технической конференции

Санкт-Петербург  
**25 – 26 июня 2019 г.**  
**23 – 28 сентября 2013 г.**



Санкт-Петербург

2019

# ТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТБОРА МОЩНОСТИ – НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**А.В. Жуйков,  
М.А. Кубаткин,  
В.С. Ларин,  
Д.А. Матвеев,  
И.И. Никулов,  
ОАО «РЭТЗ Энергия»**

## **Введение**

Трансформаторы отбора мощности (ТОМ) представляют собой однофазные индуктивные трансформаторы прямого подключения к воздушным линиям электропередачи 110–500 кВ [1]. Их отличительной особенностью является понижение напряжения между линией электропередачи и потребителем за одну ступень – без промежуточных трансформаций. Мощность этих устройств (10–500 кВА на фазу) существенно меньше таковой для силовых трансформаторов на напряжения 110–500 кВ, и конструктивно они оказываются ближе к измерительным трансформаторам напряжения. По этой причине их иногда называют трансформаторами напряжения большой или увеличенной мощности. Однако основные функции, выполняемые этими устройствами, свойственны силовым, а не измерительным, трансформаторам, поэтому авторы придерживаются наименования ТОМ.

За рубежом эти трансформаторы получили название SSVT – Station Service Voltage Transformers (трансформаторы напряжения собственных нужд станций), что отражает одно из направлений их применения [2, 3]. Однако, на сегодняшний день очевидно, что область их применения значительно шире. Помимо работы в качестве основного или резервного источника питания собственных нужд (СН) станций и подстанций они могут эффективно решать задачи электроснабжения широкого круга удаленных потребителей [4, 5]. Применение ТОМ дает существенный экономический эффект, если вблизи потребителя электроэнергии нет центра питания, но имеется воздушная линия электропередачи 110 кВ и выше.

## **1. Области применения ТОМ для электроснабжения удаленных потребителей**

Трансформаторы отбора мощности позволяют обеспечить электроснабжение потребителей, удаленных от центров питания, если в непосредственной близости находится ВЛ 110 кВ или выше. При этом отсутствие в схеме электроснабжения ВЛ 6–10 кВ является основным преимуществом решения на базе ТОМ.

Выделим несколько областей применения ТОМ.

В нефтегазовой отрасли ТОМ позволяют запитать технологические пункты: учета на трубопроводах, обогрева персонала и оборудования, насосные, мониторинга, связи, пожарной безопасности. Для системы обогрева трубопроводов на принципе скин-эффекта возможно применение ТОМ с напряжением обмотки НН 2–3 кВ.

Для электросетевых предприятий ТОМ обеспечивают организацию питания для:

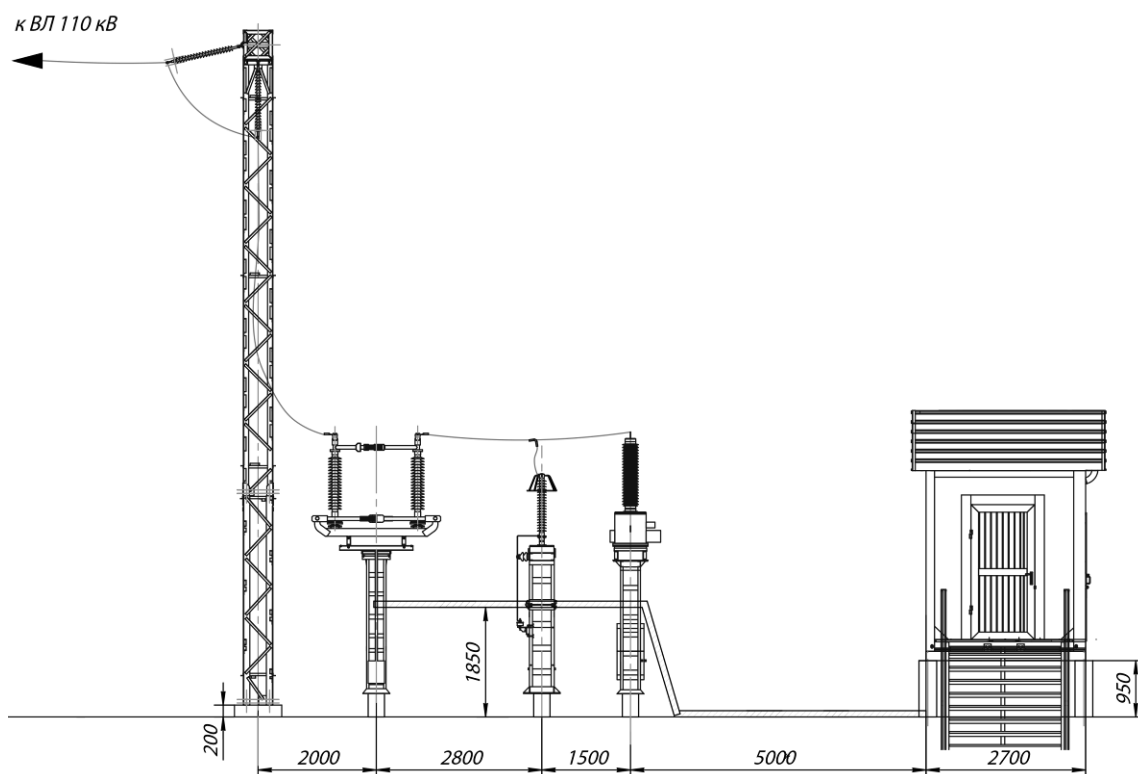
- освещения воздушных линий электропередачи, в частности, больших переходов через водные преграды;
- «постов секционирования» и выключателей отпайки ВЛ 110 кВ;
- пунктов защиты протяженных ВЛ с малым током удаленных КЗ;
- пунктов плавки гололеда (постов короткозамыкателей);
- пунктов отдыха бригад на линиях;
- пунктов временного пребывания персонала в безлюдной местности с суровыми климатическими условиями (согласно п. 2.5.19. ПУЭ-7).

В мобильном варианте ТОМ могут обеспечить электроэнергией строительство ПС и их первый пуск, а также организацию временного пункта электроснабжения от действующей ВЛ во время стихийных бедствий при выполнении ремонтных работ на «погашенных» ПС с ВЛ под охранным напряжением.

Для населения, сельского хозяйства, государственных органов, инфраструктуры открывается возможность электроснабжения:

- удаленных домовладений и небольших поселений, включая организацию индивидуального электроснабжения;
- фермерских хозяйств, отгонных пастбищ и т.п.;
- охотничьих домиков и баз, гостевых домов;
- вышек сотовой связи и метеостанций;
- пунктов базирования геологов;
- пунктов обогрева, постов ГИБДД и МЧС на пересечениях автодорог и ВЛ в удаленных районах.

Типовая компоновка мини-подстанции на базе ТОМ для электроснабжения удаленных потребителей приведена на рис. 1, где помимо ТОМ показаны разъединитель, ОПН, и ЗРУ 0,4 кВ.



**Рис. 1. Типовая компоновка мини-подстанции на базе ТОМ для электроснабжения удаленных потребителей**

Для электротранспорта применение ТОМ позволяет решить задачу электроснабжения электрозаправочных станций на пересечении автомагистралей с ВЛ 110 кВ. Здесь стоит отметить, что если на удаленном участке автодороги появляется доступ к электроэнергии, то это открывает возможность обустройства инфраструктурного дорожного центра. В него могут входить придорожное кафе, пункт обогрева в зимнее время, пост ГИБДД, пункт медицины катастроф, база для дорожных служб. Строительство этих объектов помимо очевидного социального эффекта обуславливает и сокращение срока окупаемости проекта организации электроснабжения.

Отметим, что во всех рассмотренных случаях применение ТОМ характеризуется высокой экономической эффективностью. Ориентировочно, затраты на закупку оборудования и монтаж трансформаторной мини-подстанции на базе трехфазной группы ТОМ мощностью 60–300 кВА можно оценить в 8–10 млн. рублей, что эквивалентно затратам на строительство участка ВЛ 6–10 кВ длиной в несколько километров. Для потребителей, удаленных от центров питания на большее расстояние, применение ТОМ оказывается предпочтитель-

ным. При этом дополнительно сокращаются технические потери электроэнергии за счет исключения ВЛ 6–10 кВ и многоступенчатой трансформации при традиционном способе организации электроснабжения. Сокращаются также и эксплуатационные расходы, связанные с содержанием ВЛ.

## 2. Опыт применения ТОМ

На сегодняшний день в мире разработаны опытные и промышленные образцы трансформаторов отбора мощности с масляной и элегазовой изоляцией. Компания АВВ наладила их производство для питания потребителей на низком и среднем напряжении с диапазоном высших напряжений 46–550 кВ [3, 5]. Компания Консар завершила разработки трансформатора отбора мощности с открытым (незамкнутым) магнитопроводом [4]. В Российской Федерации первые образцы таких устройств выпущены заводом «Уралэлектротяжмаш» и Раменским электротехническим заводом «Энергия». На рис. 2 показан пример опытного применения ТОМ производства ОАО «РЭТЗ Энергия» для электроснабжения ретранслятора сотовой связи на о. Сахалин.



**Рис. 2. Трехфазная группа ТОМ  
для электроснабжения ретранслятора сотовой связи**

Опыт применения ТОМ для электроснабжения удаленных бытовых потребителей имеется у компании АВВ [5]. К 2015 году Всемирным банком были профинансированы работы по обеспечению электроэнергией семи деревень в

юго-восточной части республики Конго с численностью населения от 200 до 1500 человек. Рядом с каждой из деревень проходят ВЛ 220 кВ, от которых и был организован отбор мощности. Компания АВВ разработала и построила однофазные мини-подстанции с подключением ТОМ к ВЛ через разъединитель. Дополнительно, для защиты от перенапряжений, устанавливались ОПН.

Множество пилотных проектов с ТОМ реализовано в Австралии. С 2006 г. там установлено примерно 70 аппаратов для питания собственных нужд подстанций электроснабжения шахт и рудников, а также удаленных бытовых потребителей. Первичные напряжения трансформаторов составляют 72,5, 120, 145 и 300 кВ, вторичные – 200–240 В, измерительные обмотки выполнены на  $110/\sqrt{3}$  В. Номинальные мощности аппаратов находятся в диапазоне 15–100 кВА. 32 аппарата имеют элегазовую изоляцию, и подключены напрямую к сборным шинам или ВЛ. Маслонаполненные трансформаторы подключены через разъединители для обеспечения возможности технического обслуживания. За прошедшие 10 лет не было ни одного случая аварийного выхода аппаратов из строя. Тем не менее, широкому внедрению трансформаторов отбора мощности препятствует отсутствие нормативной базы.

### **3. Современное состояние нормативной базы**

На сегодняшний день в России трансформаторы отбора мощности получили поддержку на уровне нормативных документов для применения на подстанциях в качестве независимых источников питания систем СН. В августе 2017 г. ПАО «ФСК ЕЭС» были введены нормы технологического проектирования подстанций [6], содержащие в п. 9.1.1 следующее положение: «Допускается питание собственных нужд организовывать от трансформатора(-ов) напряжения с увеличенной мощностью вторичной обмотки». Также отмечено, что трансформатор напряжения с увеличенной мощностью вторичной обмотки, подключенный к секциям (системам) шин и/или ЛЭП, которые отвечают требованиям п. 1.2.10 ПУЭ, является независимым источником питания. Регламентируется применение ТОМ и на ПС 330 кВ и выше, где следует предусматривать резервирование питания собственных нужд от третьего (резервного) источника питания.

В декабре 2018 г. в ПАО «ФСК ЕЭС» введен в действие стандарт организации «Системы собственных нужд подстанций. Типовые проектные решения» [7], имеющий ряд положений по:

- регулированию напряжения на стороне НН ТОМ;
- применению автоматических выключателей или предохранителей для защиты от токов КЗ кабельной линии, подключаемой к выводам НН ТОМ;
- возможности перегрузки ТОМ в послеаварийном режиме работы;
- системе заземления нейтрали участка сети от вывода обмоток НН ТОМ до регулировочного трансформатора.

В решении XXVIII Международной научно-технической и практической конференции «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Преобразовательная техника, коммутационные аппараты, микропроцессорные системы управления и защиты» (ТРА-ВЭК) 8.11.2018 г. было принято рекомендовать сетевым компаниям «реализацию пилотных проектов по применению трансформаторов отбора мощности для электроснабжения удаленных потребителей путем прямого подключения их к ВЛ 110-500 кВ и как источников резервного питания собственных нужд станций и подстанций», а также рекомендовать ТК16 «Электроэнергетика» Росстандарта РФ организовать разработку ГОСТ «Общие технические условия» на трансформаторы отбора мощности.

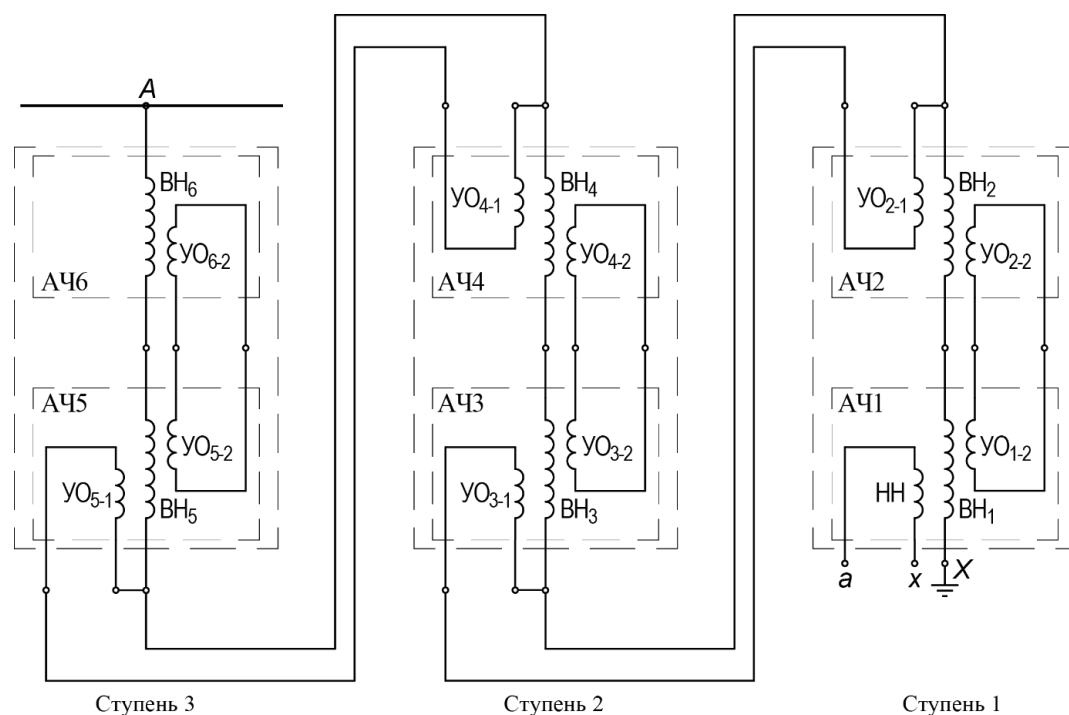
Разработка такого стандарта необходима для широкого применения ТОМ и формализации процедуры их аттестации. В международной практике такая работа уже начата. После доклада на 46-й сессии СИГРЭ в 2016 г. [2] и его обсуждения международной электротехнической комиссией (МЭК) была дана рекомендация по разработке международного стандарта на технические требования к ТОМ. В 2017 г. на заседании Технического комитета 38 «Измерительные трансформаторы» (ТК38) МЭК было принято решение о включении ТОМ (SSVT) в область деятельности комитета и о разработке стандарта. На сегодняшний день согласовано создание объединенной рабочей группы с Техническим комитетом 14 «Силовые трансформаторы» МЭК. Деятельность рабочей группы предполагается координировать с результатами рабочей группы IEEE.

С целью гармонизации требований национальных и международных стандартов и учета при разработке международного стандарта на ТОМ (SSVT) национальных интересов и практики РФ целесообразно в самое ближайшее время начать аналогичную работу в Техническом комитете по стандартизации «Электроэнергетика» (ТК016) Росстандарта, желательно с участием отечественных экспертов в рабочей группе МЭК-IEEE.

#### 4. Технические и конструктивные особенности ТОМ производства АО «РЭТЗ ЭНЕРГИЯ»

Производство ТОМ на АО «РЭТЗ Энергия» началось с опытных образцов на класс напряжения 110 кВ, имеющих номинальную однофазную мощность 20 кВА. Эти аппараты в 2017 г. успешно прошли испытания, и работают в составе мини-подстанций на о. Сахалин. В настоящее время завершена разработка трансформаторов отбора мощности от ВЛ 220 кВ каскадного исполнения с номинальным напряжением НН  $11/\sqrt{3}$  кВ. Такие аппараты позволяют запитывать высоковольтную нагрузку и передавать электроэнергию на расстояния в единицы и десятки километров.

Ведется разработка опытных образцов ТОМ для питания собственных нужд переключательной подстанции на ВЛ 500 кВ и мощных ТОМ на напряжения 110–330 кВ. Для ТОМ на сверхвысокие напряжения принята каскадная конструкция (рис. 3).



**Рис. 3. Схема соединения обмоток каскадного ТОМ 500 кВ:**

A, X – линейный и нейтральный выводы первичной стороны ТОМ;

a, x – линейный и нейтральный выводы вторичной стороны ТОМ;

$ВН_i$  – обмотка высшего напряжения  $i$ -й АЧ;

$УО_{i-1}$  – внутренняя уравнивающая обмотка  $i$ -й АЧ;

$УО_{i-2}$  – внешняя уравнивающая обмотка  $i$ -й АЧ; НН – обмотка низшего напряжения

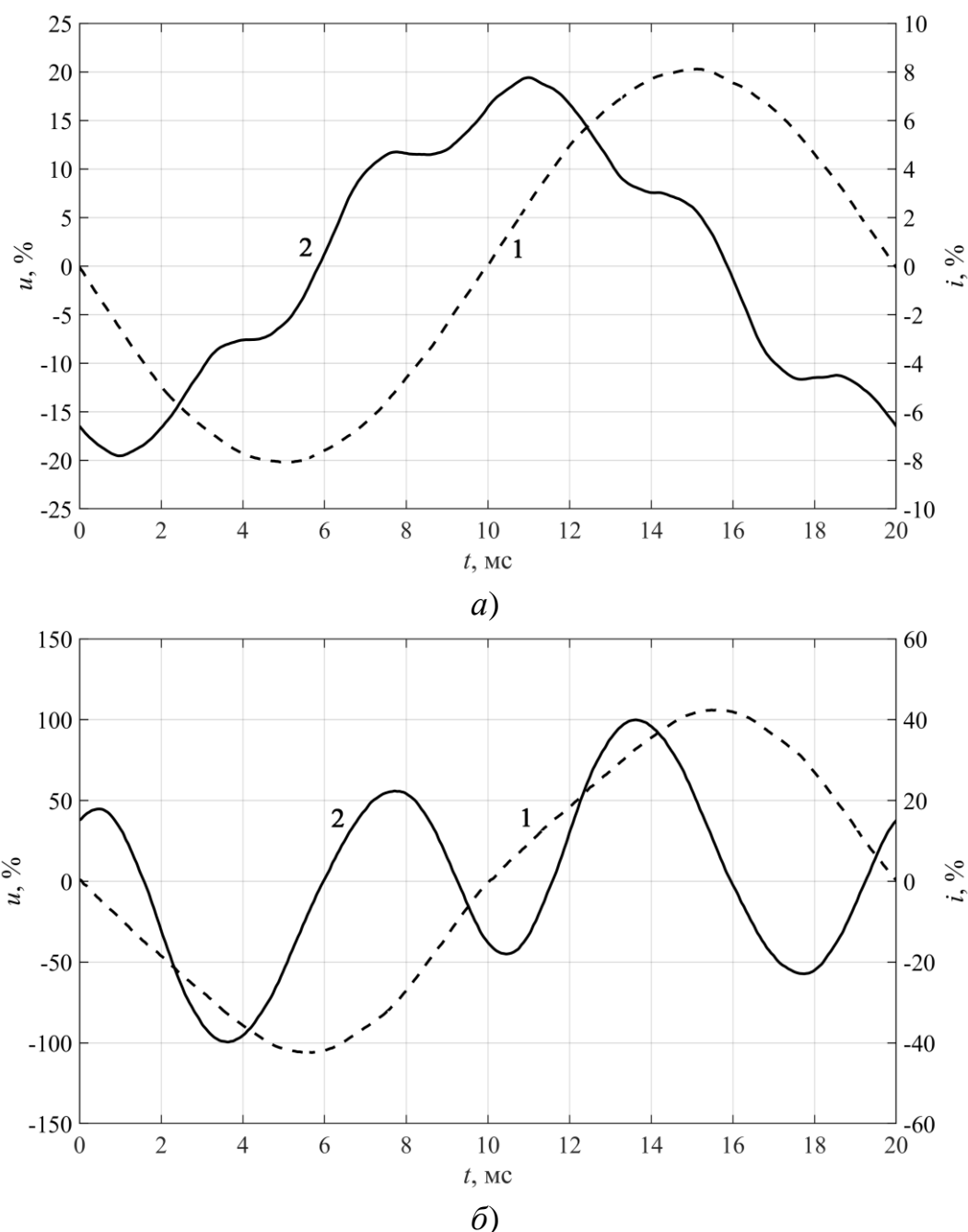
Каскадный трансформатор состоит из отдельных активных частей (АЧ). Каждая АЧ представляет собой магнитопровод с несколькими обмотками. АЧ



размещаются по две штуки в фарфоровых изоляторах, заполненных трансформаторным маслом. Каждый такой изолятор с двумя АЧ именуется ступенью каскадного трансформатора. Первичная обмотка каскадного ТОМ представляет собой последовательное соединение обмоток высшего напряжения (ВН) активных частей трансформатора. Вторичная обмотка (обмотка низшего напряжения – НН) выполняется только на нижнем магнитопроводе. Для равномерного распределения первичного напряжения по обмоткам ВН используются уравнивательные обмотки (УО). Внешние по отношению к стержню магнитопровода УО связывают АЧ одной ступени каскадной конструкции, внутренние – соседние ступени (соответственно, нижняя и верхняя АЧ не имеют внутренних УО).

Обмотки ВН ТОМ многослойные, и обладают существенной емкостью, которая, как и у индуктивных измерительных трансформаторов, приводит к преобладанию в токе холостого хода емкостной составляющей. В качестве примера на рис. 4 приведены экспериментальные осциллограммы напряжений и токов холостого хода опытного образца каскадного ТОМ 500 кВ. Из осциллограммы рис. 4,а, зарегистрированной при напряжении, в пять раз меньшем номинального, видно, что основная гармоника тока опережает напряжение. При рабочем напряжении, при котором возникает насыщение стали в зоне стыков, емкостный ток складывается с несинусоидальным током намагничивания, что приводит к появлению в токе ярко выраженной третьей гармоники (рис. 4,б). В обоих случаях отделить емкостную составляющую тока затруднительно.

Отдельное внимание в конструкции ТОМ уделено снижению мощности намагничивания. Для исключения влияния емкостных токов на результаты измерений тока намагничивания экспериментальное определение характеристик намагничивания магнитопроводов активных частей ТОМ проводилось на активных частях без обмотки ВН. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости удельной полной мощности намагничивания  $S$  и удельной мощности потерь  $P$  от индукции в магнитопроводах ТОМ трех модификаций, изготовленных с прямым стыком пластин. Магнитопроводы №1 и №2 изготовлены с шихтовкой через две и одну пластины соответственно. В магнитопроводе №3 применены чередование ширин пластин и шихтовка через одну пластину. Из рис. 5 видно, что в последнем случае удастся добиться многократного снижения полной мощности намагничивания в диапазоне рабочих индукций 1–1,5 Тл и сокращения активных потерь на 10–20% по сравнению с конструкциями №1 и №2.

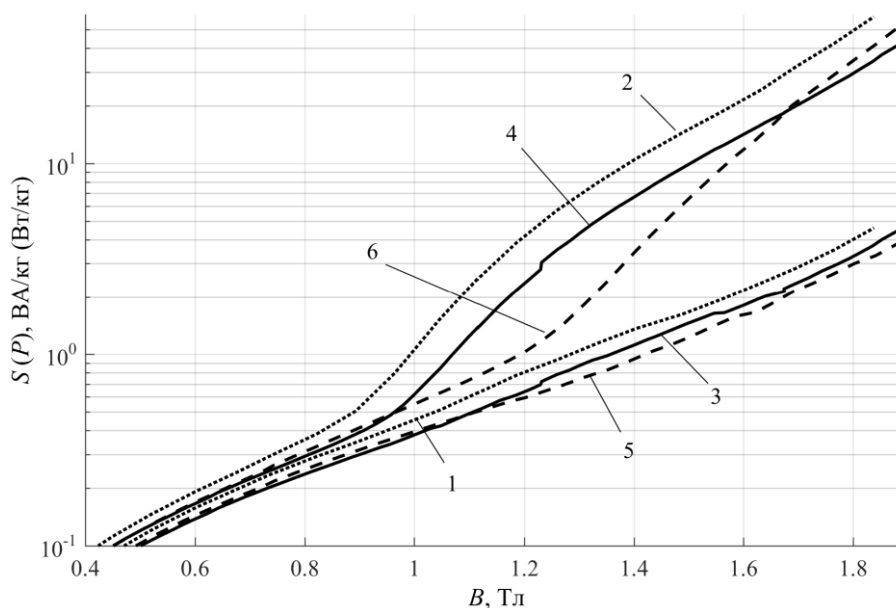


**Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы напряжения • и тока • холостого хода опытного образца каскадного ТОМ 500 кВ:**

а – измерение при  $U = 0,20U_{\text{ном}}$ ; б – измерение при  $U = 1,01U_{\text{ном}}$

Для проектирования изоляции ТОМ проведены исследования на макетах электрической прочности изоляционных узлов ТОМ, сформулированы критерии электрической прочности и выполнены трехмерные конечно-элементные расчеты электрических полей в изоляции, что позволило обеспечить необходимые технические характеристики ТОМ при минимальных габаритах. Приняты во внимание результаты экспериментальных исследований электромагнитных процессов в ТОМ при импульсных и высокочастотных воздействиях [8, 9], в

частности, предусмотрена защита от резонансных перенапряжений при взаимодействии ТОМ с внешней сетью [10].



**Рис. 5. Экспериментальные характеристики намагничивания магнитопроводов ТОМ:**  
1 и 2 –  $P$  и  $S$  магнитопровода №1; 3 и 4 –  $P$  и  $S$  магнитопровода №2;  
5 и 6 –  $P$  и  $S$  магнитопровода №3

В трансформаторах отбора мощности по сравнению с традиционными силовыми трансформаторами применяются другие типы и конструкции обмоток. Это определяет существенные различия в частотах собственных колебаний и воздействиях на изоляцию их обмоток, а также теоретическую возможность развития резонансных перенапряжений при других сочетаниях параметров сети и коммутаций. Для надежной работы ТОМ эти особенности должны быть учтены на стадии проектирования путем выбора соответствующей конструкции и запасов электрической прочности изоляции обмоток.

Первоочередной задачей для оценки возможности развития резонансных перенапряжений является определение доминирующих частот переходных колебаний напряжения в сети и собственных частот колебаний обмоток трансформаторов и сопоставление их между собой.

Источником периодических воздействий на первичную обмотку ТОМ являются переходные колебания напряжения в воздушной линии (ВЛ), к которой он подключен. В первую очередь, это сопровождающиеся перенапряжениями переходные процессы, возникающие при плановых включениях ВЛ и при автоматическом повторном включении (АПВ). Как показано в [10], при длинах ВЛ 110 кВ, составляющих несколько десятков километров, собственные колебания затухают достаточно долго, особенно в мощных сетях. Характерные значения первой собственной частоты колебаний ВЛ 110 кВ находятся в диапазоне 1–10

кГц. Амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз за десять и более периодов колебаний. Такие воздействия могут вызывать резонансные процессы в подключенном к ВЛ оборудовании.

Исследования резонансных процессов в первичной обмотке были выполнены на макетном образце ТОМ класса напряжения 110 кВ [8, 9]. Трансформатор имеет одну первичную обмотку (ВН) и две вторичные обмотки – силовую (НН2) и измерительную (НН1). Первичная обмотка трансформатора – многослойная цилиндрическая, состоит из 68 слоев и имеет 11 отпайек от промежуточных слоев, доступных для проведения измерений (более подробное описание конструкции трансформатора приведено в [8]).

Для оценки резонансного повышения напряжения были выполнены измерения передаточных функций напряжений на отпайках с концов слоев первичной обмотки. Для этого использовался подход [11, 12], который заключается в применении измерительной системы для оценки состояния трансформаторов по методу частотных характеристик (МЧХ, в зарубежной терминологии – Frequency Response Analysis – FRA). Для построения передаточных функций из канала измерения отклика было исключено согласующее сопротивление 50 Ом, и для соединения с объектом измерений использован высокочастотный измерительный щуп с полосой пропускания 500 МГц и коэффициентом деления 10:1, имеющий большое входное сопротивление (10 МОм) и относительно малую входную емкость (11,1 пФ).

Кроме того, были выполнены измерения частотной характеристики первичной обмотки в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц по схеме “end-to-end” [13]. Для оценки собственных частот колебаний этой обмотки был использован подход на основе определения локальных максимумов ее активной проводимости [11].

Измеренные значения первых пяти собственных частот ТОМ, определенные по максимумам активной проводимости, приведены в таблице 1. Для определения воздействий на продольную изоляцию дополнительно были определены градиенты напряжений между соседними отпайками. Характерные передаточные функции приведены в [10].

Таблица 1

Первые пять собственных частот колебаний обмотки ВН ТОМ 110 кВ

Номер собственной частоты	1	2	3	4	5
Значение собственной частоты, кГц	4,63	8,68	14,00	17,83	23,93

По итогам обработки результатов измерений было получено, что максимум напряжения в середине обмотки достигается на частоте около 4,53 кГц, а максимумы в точках 1/4 и 3/4 длины обмотки – на частоте около 8,58 кГц. Эти

частоты примерно соответствуют первой и второй собственным частотам обмотки, определенным по максимумам активной проводимости обмотки (табл. 1).

Наиболее явно проявляются колебания в обмотке на первой, второй и третьей собственных частотах, при этом колебания на высших гармониках практически неразличимы в пространственном распределении напряжения.

Анализ градиентов напряжения показал, что имеются два резонансных пика на частотах 4,8 и 8,8 кГц, которые попадают в диапазон возможных воздействий со стороны сети. Кратность градиента напряжения по отношению к градиенту на частоте 50 Гц на частоте 4,8 кГц достигает 5,1, на частоте 8,8 кГц – 6,4, и возникновение существенных резонансных перенапряжений в первичной обмотке ТОМ при включении ВЛ оказывается вполне возможным. Для обеспечения надежной работы ТОМ выполнено соответствующее усиление продольной изоляции.

## **Выводы**

1. Трансформаторы отбора мощности представляют собой перспективные устройства, способные предоставить экономичные, надежные и предпочтительные технические решения для широкого круга задач по обеспечению электроснабжения.

2. Новые нормативные документы ПАО «ФСК ЕЭС» открывают возможность реализации пилотных проектов по применению ТОМ в качестве источников питания системы СН.

3. Целесообразно в ближайшее время начать в Техническом комитете по стандартизации «Электроэнергетика» (ТК016) Росстандарта разработку государственного стандарта РФ «Трансформаторы отбора мощности. Общие технические условия».

4. Конструктивные особенности ТОМ обуславливают ряд технических особенностей, не характерных для традиционных силовых трансформаторов, что необходимо учитывать при разработке государственного стандарта.

5. Для накопления опыта применения и совершенствования проектных решений, а также для дальнейшего развития нормативно-технической базы, необходима реализация пилотных проектов с применением ТОМ в РФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор Соглашения – RFMEFI57717X0243).

## Литература

1. Д.А. Матвеев, В.С. Ларин, И.И. Никулов. Перспективы применения трансформаторов отбора мощности от ВЛ 110-500 кВ // Энергоэксперт, №5, 2017, С. 80-83.
2. E. Regil, A. Burgos. Inductive Voltage Transformers for Auxiliary Services Power Supply in Substations. Design, Specification and Normative Aspects and Application Example // CIGRE Session Report, Paris, 2016.
3. D. Xu, N.S. Powers, M. Paul, W. Sae-Kok, P. Suksirithawornkul. Alternative Power Source in Various Substation Applications // IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), 3–6 Nov, 2015.
4. I. Žiger, B. Bojanić, D. Krajtner. Power Voltage Transformers — Expanding Beyond Station Service // IEEE Power & Energy Society General Meeting, 26-30 Jul, 2015.
5. D. Xu, N.S. Powers, W. Sae-Kok. Development of a Power Source for Rural Electrification // IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 8-11 Oct, 2015, P. 340-347.
6. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ.
7. СТО 56947007-29.240.40.263-2018. Системы собственных нужд подстанций. Типовые проектные решения.
8. А.В. Жуйков, М.А. Кубаткин, Д.А. Матвеев, С.И. Хренов, В.С. Ларин, И.И. Никулов. Исследование импульсных перенапряжений в обмотках трансформаторов отбора мощности // Электротехника, №5, 2018, С. 22-26.
9. В.С. Ларин, Д.А. Матвеев, А.В. Жуйков. Исследование наведенных перенапряжений на вторичных обмотках трансформатора отбора мощности // Электротехника, №5, 2018, С. 27-32.
10. В.С. Ларин, Д.А. Матвеев, А.В. Жуйков, М.А. Кубаткин, И.И. Никулов. Резонансные перенапряжения в первичной обмотке трансформатора отбора мощности // Электротехника, №8, 2018, С. 46-52.
11. V. Larin, D. Matveev, A. Volkov. Study of transient interaction in a system with transformer supplied from network through a cable: assessment of interaction frequencies and resonance evolution // Proceedings of the 3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Split, Croatia, October 15 – 17, 2014.
12. В.С. Ларин. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч.3. Измерения напряжения в обмотках на резонансных частотах // Электричество. – 2016. – № 1. – С. 20-24.
13. IEC 60076-18 ed. 1. Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response. International Electrotechnical Commission. July, 2012. ISBN 978-2-83220-222-7.