

ДОКЛАД

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

к.т.н. Савинцев Юрий Михайлович

ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Уважаемые коллеги!

Перед началом моего доклада хочу публично выразить благодарность за поддержку и многократные обсуждения материала настоящего доклада к.т.н. Стулову Алексею Вадимовичу, зам. ген. директора ООО «Трансформер» и д.т.н. Воротницкому Валерию Эдуардовичу, главному научному сотруднику НТЦ ФСК ЕЭС.

Уважаемые коллеги! Темой моего доклада формулируется как «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ».

Актуальность тематики исследования определяется следующим.

6 апреля 2020 года была утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», в которой определено: «(...)

145. Главной задачей электроэнергетики ... является повышение надежности и качества энергоснабжения потребителей до уровня, сопоставимого с лучшими зарубежными аналогами, с обеспечением экономической эффективности таких услуг. (...).

В разделе «Пространственное и региональное развитие сферы энергетики» указывается, что « (...)

177. Задачей электроэнергетики ... является повышение эффективности электросетевого комплекса.

178. В комплекс ключевых мер, обеспечивающих решение поставленной задачи, входят:

а) повышение качества разработки схем и программ развития электроэнергетики, в том числе прогноза спроса на электрическую энергию и мощность на основании данных о реализации на территориях субъектов Российской Федерации инвестиционных проектов;

б) повышение эффективности, в том числе экономической, технологий передачи электрической энергии;

в) совершенствование системы оперативно-технологического управления в территориальных сетевых организациях;

г) переход на риск-ориентированное управление производственными активами в электросетевом комплексе на базе цифровых технологий;

...

179. Показатели решения задачи представлены в таблице 12.

Таблица 12.

Показатели решения задачи электроэнергетики				
Задача, пункт	Показатель	Значения показателя, год		
		2018 (факт)	2024	2035

177	Уровень потерь электрической энергии в электрических сетях, не более, % (...)	10,6	9,8	7,3
-----	---	------	-----	-----

В разделе 3.3. «Достижение технологической независимости ТЭК и повышение его конкурентоспособности» указано, что « (...) на основе анализа результатов пилотных проектов будут намечены меры по широкомасштабному распространению эффективных цифровых технологий в отраслях ТЭК (...)».

Как видно, для успешной реализации Стратегии, для скорейшей цифровизации электроэнергетики требуется серьезнейший фундамент, а именно: 1) современные диагностические системы; 2) аппаратно-программные комплексы по типу цифрового двойника на базе самого современного методологического и математического аппарата; 3) современное энергоэффективное оборудование, в том числе, энергоэффективные распределительные трансформаторы.

Максимально эффективное функционирование электrorаспределительного комплекса требует дополнительной проработки и новых решений, в частности, по следующим проблемам:

1. **Эффективное управление структурой** распределительного трансформаторного комплекса, в том числе, прогнозирование ежегодной номенклатурной и количественной потребности в закупке новых силовых и распределительных трансформаторов.
2. **Эффективное управление затратами** на функционирование распределительных электросетей, в частности, минимизация удельной стоимости трансформации электроэнергии в рамках отдельных региональных распределительных компаний и в масштабах ЕЭС страны в целом.
3. **Оптимальное управление режимами эксплуатации** распределительного трансформаторного комплекса, в том числе, выбор оптимальной загрузки силовых и распределительных трансформаторов для обеспечения минимальной удельной стоимости трансформации электроэнергии.
4. **Оптимальное управление энергоэффективностью** распределительного трансформаторного комплекса, в том числе нормирование потерь холостого хода и короткого замыкания всех силовых и распределительных трансформаторов в зависимости от требований глобальной экологии и макроэкономических параметров, в частности, энергоемкости внутреннего валового продукта. Управление энергоэффективностью, в конечном счете, связывает все предыдущие проблемы.

В связи с вышеизложенным **объектом исследования** является распределительный трансформаторный комплекс как страны в целом, так и любой отдельной административно-территориальной единицы.

Предмет исследования - закономерности, описывающие структуру и эволюцию объекта исследования.

Цель исследования: Разработка теоретических основ моделирования трансформаторных комплексов в распределительных электросетях.

Для достижения поставленной цели исследования были решены следующие **задачи:**

1. Выявление и формулировка объективных закономерностей, описывающих структуру и эволюцию распределительных трансформаторных комплексов.
2. Математическое моделирование выявленных закономерностей.
3. Составление математической модели и алгоритма формирования структуры трансформаторных комплексов в распределительных электросетях (модель и алгоритм прогнозирования потребности в трансформаторах разных мощностей).
4. Составление математической модели энергоэффективности трансформаторного комплекса в распределительных электросетях и алгоритма нормирования потерь в энергоэффективных трансформаторах.
5. Составление математической модели удельных затрат на трансформацию в трансформаторных комплексах распределительных электросетей.
6. Составление алгоритма оптимизации загрузки энергоэффективных трансформаторов в трансформаторных комплексах распределительных электросетей.

Закономерности формирования трансформаторного комплекса в электрораспределительной сети. Техноценозы.

Научное исследование начинается с анализа проблем. Такой проблемой для докладчика стал в начале 2000-х годов вопрос об объеме рынка распределительных трансформаторов России. Анализ источников в крупнейших библиотеках России, РГБ и ГПНТБ, и в сети Интернет, ответа найти не позволил. Складывалось представление, что все трансформаторные заводы в России и СНГ выпускают продукцию, не имея представления о главном рыночном параметре своего бизнеса – об объеме спроса на распределительные трансформаторы.

Первая попытка автора оценить объем рынка распределительных трансформаторов в России основывалась на следующей модели. Все потребители были разбиты на несколько групп, по которым известны нормативы обеспечения трансформаторной мощностью; на основе данных о росте объемов производства можно было определить рост потребной нормативной трансформаторной мощности и, суммируя потребную трансформаторную мощность по всем группам, спрогнозировать рост суммарной трансформаторной мощности. Но сразу же встала проблема: как распределены численности трансформаторов разных мощностей. Предварительные статистические данные по этой проблеме были получены на основе информации о продажах нескольких трансформаторных заводов. Однако данные были противоречивыми. Поэтому прогноз потребности в распределительных трансформаторах был сделан для «средней», условной мощности трансформатора.

В процессе исследований при анализе первого варианта прогнозной модели стало ясно, что такой «усреднённый» подход рассматривает распределительный трансформаторный комплекс как механическую совокупность отдельных единиц оборудования - распределительных трансформаторов некой «средней» условной мощности. Такая механистическая парадигма, как это было осознано автором, игнорирует очевидную целостность распределительного трансформаторного комплекса. Целостность определяется тем, трансформаторный комплекс создаётся изначально и будет впоследствии продолжать развиваться не произвольно, а для целей электроснабжения увеличивающейся совокупности электроприёмников. И как изначально комплекс просто должен состоять из трансформаторов разных мощностей, так и со временем в его составе будут появляться не одинаковые, а самые разнообразные по мощности трансформаторы.

Структура трансформаторного комплекса в распределительных электросетях подобна законченному литературному произведению. Если разные слова уподобить трансформаторам разной мощности, то следует предположить, что также как одни слова встречаются в тексте чаще, а другие реже, так и трансформаторы: одни будут чаще встречаться, другие реже.

Сравнение трансформаторного комплекса с законченным литературным произведением – не случайно. Законченное литературное произведение является целостным. Осознание целостности распределительного трансформаторного комплекса привело автора доклада к новой парадигме рассмотрения его структуры. Эта парадигма была введена в рассмотрение совокупностей технических объектов профессором, д.т.н. Борисом Ивановичем Кудриным в начале 70-х годов XX века [1]. И она явилась развитием применительно к технике закона Ципфа, который описывает распределение частоты слов в целостном, законченном тексте (литературном произведении).

ТЕХНОЦЕНОЗЫ

Фундаментальным понятием математической модели структуры трансформаторного комплекса является понятие **техноценоза**. Термин «техноценоз» для описания совокупностей технических объектов был введён Кудриным Борисом Ивановичем в 70-х годах XX века по аналогии с термином «биоценоз» в живой природе. В продолжении данной аналогии отдельный трансформатор представляет особь. Совокупность трансформаторов одной мощности составляют вид. Все трансформаторы всех мощностей – род (семейство).

По определению Бориса Ивановича Кудрина «Техноценоз – сообщество изделий конвенционально определённого объекта, (...) множество образующих целостность элементов-изделий, характеризующееся слабыми связями и слабыми взаимодействиями относительно друг друга; система техногенного происхождения, рассматриваемая как сообщество классифицируемых по видам единиц техники, технологии, материала, продукции, отходов, и выделяемая административно-территориально для целей инвестиционного проектирования, построения (сооружение, монтаж, наладка), обеспечения функционирования (эксплуатация, ремонт), управления (менеджмент)» [2].

Термин вид определяется следующим образом [2]: «Вид изделия – структурная единица в систематике изделий: изделия двух разных видов отличаются количественной и обязательно качественной характеристиками; изделия одного вида изготавливаются по одной проектно-конструкторской документации. К общим признакам вида относятся: определённая численность, тип организации, способность в процессе работы и воспроизводства сохранять качественную определённость, дискретность, экологическая, экономическая и географическая определённость, устойчивость, целостность (не различают в отдельных случаях вид и понятия: наименование, название, типоразмер, проба, модель, сортамент, марка, артикул, выпуск, тип, профиль)».

При этом новая парадигма – это не есть системный подход. Говоря о соотношении техноценологической парадигмы и системного подхода, Борис Иванович Кудрин отмечает: «Многое из теории систем не применимо к теории техноценозов. Техноценоз вообще не делится на части, а образуется, и не частями, а неделимыми элементами, каждый из которых выполняет единичное количество функций, и эти функции слабо определяются другими (существует статистическая незначимость связей и взаимодействий). Для техноценоза отсутствуют (неприменимы) ключевые понятия теории систем: вход, выход, обратная связь...» [2].

Данное выше определение техноценоза гносеологически позволяет применить математический аппарат негауссовых гиперболических H -распределений для исследования систем (объектов) типа трансформаторных комплексов. Исследование техноценоза при этом будет исследованием целостности, которая структурируется и характеризуется устойчивыми параметрами.

Математическая модель структуры трансформаторного комплекса распределительной электросети состоит из следующих компонентов: 1) формула для расчета суммарной потребной трансформаторной мощности, обеспечивающей суммарное электропотребление; 2) математическое описание структуры трансформаторных комплексов; 3) формула для расчета константы распределения - количества трансформаторов наименьшей мощности (наибольшего количества), 4) метод определения характеристики гиперболического распределения, описывающего структуру трансформаторного комплекса в распределительных электросетях – показателя степени в гиперболическом распределении.

ВЫЯВЛЕНИЕ ОБЪЕКТИВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

В соответствии с методологией проф. Кудрина Б.И., автор выделил совокупность силовых и распределительных трансформаторов, эксплуатируемых в пределах некоторой административно-территориальной единицы. В качестве объекта исследования для выявления закономерностей структуры трансформаторных комплексов распределительных электросетей рассматривались трансформаторы на территории МРСК «Центра и Приволжья».

Данная совокупность объектов (трансформаторов) есть целостность со слабыми связями: целостность определяется несколькими факторами: единая цель функционирования, единый регламент функционирования. Слабость связей выражается как в удаленности отдельных трансформаторов (особей) друг от друга, так и в отсутствии между большинством трансформаторов прямой гальванической связи.

Таким образом, есть основания полагать, что выделенная целостность будет обладать свойствами техноценоза. То есть распределение видов (номинальных мощностей) по численности (частоте появления), ранжированных в порядке убывания частоты, должна математически описываться гиперболой.

Результаты обработки собранной информации по количеству трансформаторов разных мощностей (от 400 кВА до 16000 кВА) представлены на графике рис. 1. После анализа различных аппроксимаций полученной опытной кривой распределения наилучшее совпадение ожидаемо показала степенная кривая, - гипербола с показателем степени $-1,44$.

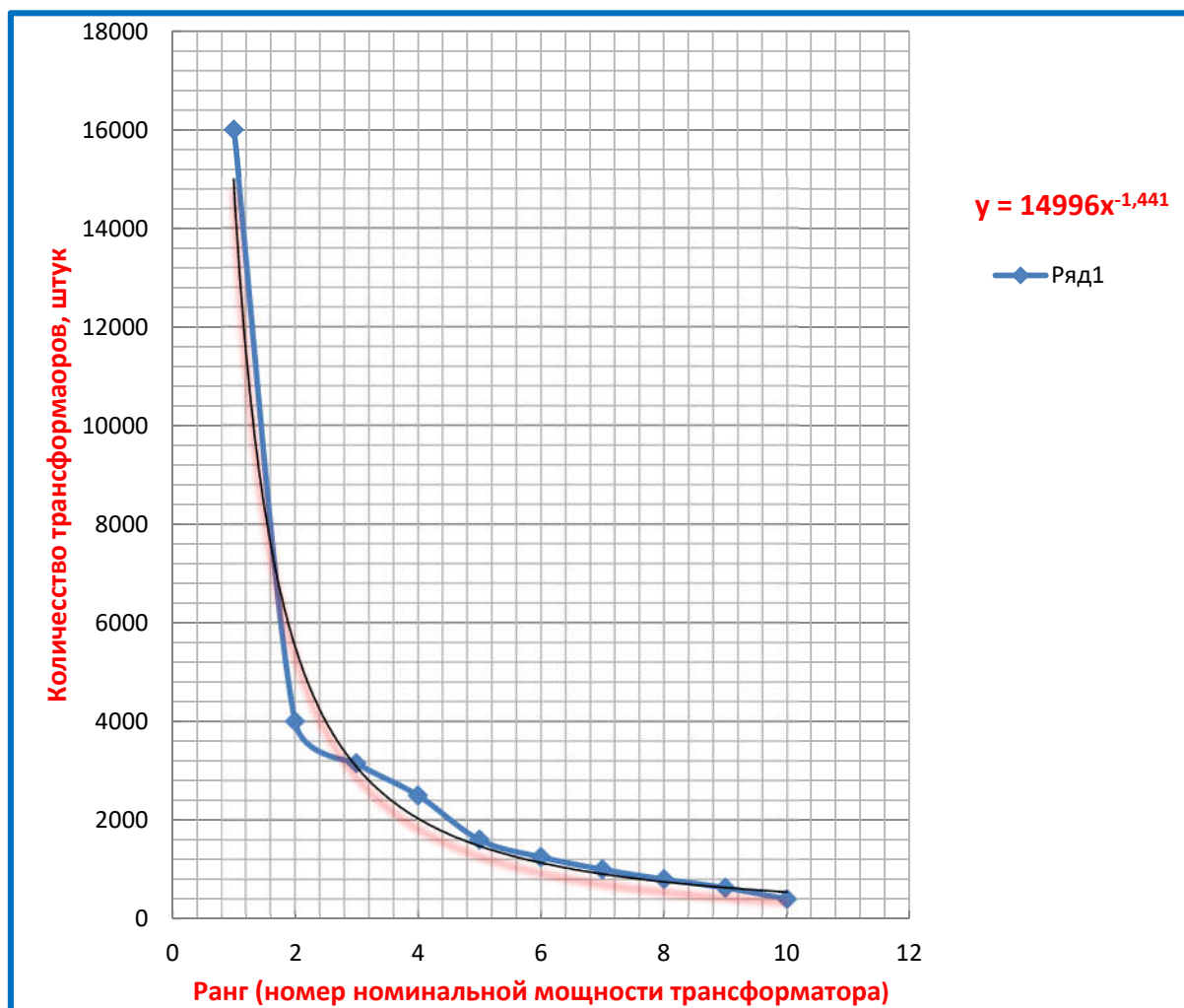


Рис. 1. Зависимость количества трансформаторов от порядкового номера номинальной мощности (ранга).

В последующем, для моделирования трансформаторных комплексов распределительных электросетей было принято, что распределение всей суммарной потребляемой электроэнергии осуществляется при посредстве трансформаторов мощностью 25 кВА – 6300 кВА. Таким образом, как семейство (род) определяются все трансформаторы указанных мощностей; видовой признак таксона «вид» - номинальная мощность трансформатора - 25 кВА, 40 кВА, 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА, 250 кВА, 400 кВА, 630 кВА, 1000 кВА, 1600 кВА, 2500 кВА, 4000 кВА, 6300 кВА, - всего 13 видов. Особью считается каждый отдельный трансформатор. Так как при исследовании совокупности трансформаторов МРСК «Центра и Приволжья» была однозначно установлена закономерность, что трансформаторов малой мощности много («саранчовая» каста), а трансформаторов большой мощности – мало («ноева» каста), то первый ранг $r_1 = 1$ присвоен виду «мощность 25 кВА», последний ранг $r_{13} = 13$ имеет вид «мощность 6300 кВА». Выделенный таким образом техноценоз условно назван автором «ТТРК» (территориальный трансформаторный распределительный комплекс).

Под структурой техноценоза «ТТРК» понимается таблица (или другой вид записи), содержащая упорядоченные по количеству совокупности трансформаторов одинаковой мощности. Данная структура характеризуется перечнем номинальных мощностей, общим количеством трансформаторов, суммарной трансформаторной мощностью, количеством трансформаторов каждой номинальной мощности. В

зависимости от задачи исследования техноценоза «ТТРК» в таблицу добавляются данные о ценах, о характеристиках потерь хх и кз, о загрузке трансформаторов.

ФОРМУЛА РАСЧЁТА ПОТРЕБНОЙ СУММАРНОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ МОЩНОСТИ

Расчет суммарной потребной трансформаторной мощности S_{Σ} ТТРК основан на допущении, что эта мощность в 7 раз превышает мощность электроприемников-потребителей. Данное значение коэффициента получено в результате обобщения данных других авторов, в частности выдающего специалиста по проектированию трансформаторов Павла Михайловича Тихомирова [3], в результате анализа данных Системного оператора о производстве и потреблении электроэнергии за последние годы. Кроме того, дополнительно это значение можно обосновать следующими фактическими характеристиками ЕЭС страны: 1) средняя загрузка трансформаторов в распределительных сетях требует [4] требует на 1 кВА нагрузки примерно 1,7 кВА трансформаторной мощности; 2) как правило, подстанции являются двухтрансформаторные; 3) до потребителя осуществляется две ступени трансформации с 35 кВ на 10(6) кВ, и с 10(6)/0,4 кВ; 5) $\cos \varphi$ нагрузки в первом приближении принят равным 1. Перемножение перечисленных мультипликаторов и даёт также (при округлении) коэффициент 7. Временным периодом принят календарный год.

Таким образом

$$S_{\Sigma} = \frac{7 * P_{\Sigma}}{8760}, \quad (1)$$

где

S_{Σ} суммарная трансформаторная мощность ТТРК, МВА;

P_{Σ} суммарная потребление электроэнергии потребителей, МВт*час.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЦЕНОЗА «ТТРК»

В соответствии с описательной моделью структура техноценоза «ТТРК» определяется гиперболическим распределением, которое может быть представлено в виде

$$N_i = \frac{N_1}{r_i^{\beta}} \quad (2)$$

Где N_i - константа распределения; в случае ТТРК определяет количество трансформаторов наименьшей мощности и наибольшей численности; это «вид», которому присваивается первый порядковый номер (первый ранг);

β - характеристический показатель ранговидового распределения;

r_i - ранг (порядковый номер) каждого «вида» (каждой мощности) трансформаторов;

N_i - количество трансформаторов ранга i .

ФОРМУЛА РАСЧЕТА КОНСТАНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Константу распределения N_1 - количество трансформаторов ранга 1 (наименьшей мощности, наибольшего количества) можно найти следующим образом. Заметим, что суммарная мощность всех трансформаторов техноценоза «ТТРК» равна

$$S_{\Sigma} = \sum(N_i * S_i) \quad (3)$$

где

S_{Σ} – суммарная трансформаторная мощность техноценоза «ТТРК»,

N_i – количество трансформаторов мощности S_i ранга i .

Заменяя в выражении (3) величину N_i по формуле (1), получаем следующую формулу для вычисления величины N_1

$$N_1 = \frac{S_{\Sigma}}{\sum(S_i/r_i^{\beta})} \quad (4)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ β

Значение характеристического показателя $\beta = 1,44$ было получено ранее статистической обработкой реальной совокупности силовых трансформаторов, установленных в МРСК Центра, МРСК Центра и Приволжья. Как предполагает автор - это число имеет фундаментальное значение для электrorаспределительных сетей и отражает их сложившуюся структуру, как отдельного самостоятельного экономического региона, так и страны в целом. Но при этом вопрос об оптимальности структуры данного техноценоза остается открытым.

Устойчивость, т.е. по сути, надежность и работоспособность сетей МРСК, находится в полном согласии с фундаментальными выводами работ последователя Бориса Ивановича Кудрина профессора, д.т.н. Виктора Ивановича Гнатюка [5], наилучшим является диапазон структур техноценоза, описываемый ранговидовыми распределениями $0,5 < \beta < 1,5$. Полученное значение $\beta = 1,44$ удовлетворяет данному условию.

АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При объеме электропотребления в 2019 году $1059,3 \cdot 10^6$ МВт*час суммарная потребная трансформаторная мощность ТТРК должна составлять

$$S_{\Sigma} = \frac{7 * 1059,3 * 10^6}{8760} = 846\,472 \text{ МВА}$$

Из отчетности ПАО «Россети» за 2018 год суммарная трансформаторная мощность подстанций составляет 792 000 МВА.

На основании аналогичного отчета ФСК ЕЭС суммарная трансформаторная мощность подстанций этой организации составляет 352 000 МВА

Для полученного выше значения S_{Σ} с учетом найденного значения характеристического показателя $\beta = 1,44$ по формуле (4) можно найти значение константы распределения $N_I = 1\ 399\ 732$ шт.

Количество трансформаторов всех рангов (номинальных мощностей) можем быть рассчитано по формуле (2). Полученная структура варианта техноценоза «ТТРК» приведены в таблице 1. Общее количество распределительных трансформаторов, обеспечивающих годовое электропотребление в объеме $1059,3 \cdot 10^6$ МВт*час составляет 3 020 649 штук.

Таблица 1. Структура варианта техноценоза «ТТРК»

Номинальная мощность трансформатора, кВА	ранг	Штук
25	1	1399732
40	2	515895
63	3	287733
100	4	190142
160	5	137889
250	6	106049
400	7	84938
630	8	70080
1000	9	59147
1600	10	50821
2500	11	44304
4000	12	39086
6300	13	34831
	ВСЕГО	3020649

По данным экспертов численность распределительных трансформаторов в России составляет ~ 3 миллиона штук.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

В «Энергетической стратегии...» к 2035 году предусмотрено снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях до уровня 7,3%. Потенциал энергосбережения в России в финансовом выражении представлен в таблице 2. В данной модели оценки предположено, что все установленные обычные трансформаторы одномоментно заменяются энергоэффективными трансформаторами уровня X2K2 (по Стандарту СТО 34.01-3.2-011-2017). При расчётах загрузка распределительных трансформаторов в целом по стране принята равной 0,7.

Поэтому задачей управления энергоэффективностью при эксплуатации распределительных трансформаторов следует считать всестороннее обоснование

нормативов потерь x_x и k_z распределительных трансформаторов. Почему эта проблема так важна и актуальна? Потому что энергоэффективные трансформаторы, безусловно, должны иметь более высокую цену, чем трансформаторы со стандартными характеристиками потерь. И стоимость трансформации электроэнергии в случае их применения также будет выше. Поэтому важно, чтобы требуемые характеристики мощности потерь холостого хода и короткого замыкания (далее потери x_x и потери k_z) энергоэффективных трансформаторов были обоснованно лучше, а не произвольно хороши настолько, что стоимость приобретения стала непомерно высока, не оправдывая при этом получаемый эффект.

Если посмотреть ретроспективу изменения нормативов потерь, то имеет место следующая ситуация. Характеристики мощности потерь x_x и k_z стандартных трансформаторов, указанные в ГОСТ 11920-85 и ГОСТ 12022-76, были получены на основе многолетнего опыта эксплуатации и проектирования из требования сохранения диэлектрических свойств изоляции в течение установленного срока эксплуатации (25 лет), а именно: нагрев элементов конструкции трансформатора за счет потерь электроэнергии не должен превышать заданных нормированных величин, чтобы деструктивные процессы в изоляции за счет термического воздействия не привели к выходу ее (и трансформатора в целом) из строя. ГОСТ 11677-85 требований к конкретным значениям характеристик потерь x_x и k_z уже не содержал. Новый ГОСТ Р 52719-2007 стал практически новой, российской, редакцией ГОСТа 11677 и также не содержит конкретных значений потерь x_x и k_z . 12.04.2017г введен в действие отраслевой Стандарте СТО 34.01-3.2-011-2017, посвященный только требованиям к параметрам потерь распределительных трансформаторов. в зависимости от конкретных значений потерь назначены четыре класса энергоэффективности распределительных трансформаторов. Однако по информации от одного из разработчиков Стандарта, конкретные значения в Стандарте были «назначены» от имеющейся базы: 1) существующих на текущий момент характеристик выпускаемых энергоэффективных трансформаторов; 2) существующих зарубежных стандартов на энергоэффективные трансформаторы. К тому в Стандарте допущена грубая ошибка в показателях потерь холостого хода трансформаторов мощности 630 кВА.

С точки зрения автора, нормативы Стандарта можно было бы рассчитать с использованием полученной модели, описывающей структуру любого, в том числе, как распределительного трансформаторного комплекса страны в целом, так и любого отдельного регионального распределительного комплекса. Для расчёта нормативов потерь на базе модели структуры ТТРК разработана математическая модель энергоэффективности силовых трансформаторов. При этом автор исходил из новой, предложенной им, парадигмы энергоэффективности.

Автор предлагает рассматривать энергоэффективность не как параметр силового трансформатора, а как управляемое состояние территориальных комплексов распределительных трансформаторов. Такой подход оправдан уже тем, что суммарные потери отдельного трансформатора зависят не только от характеристик трансформатора, но и от коэффициента загрузки трансформатора. Поэтому энергоэффективность – это динамичное состояние трансформаторного комплекса, и

оно определяется степенью согласованности конструктивных параметров отдельных трансформаторов и режимов эксплуатации этих трансформаторов. Режимы эксплуатации, обеспечивающие энергоэффективность трансформаторного комплекса, должны выбираться из условия минимума удельной стоимости трансформации электроэнергии.

Таким образом, математическая модель энергоэффективности трансформаторного комплекса логически состоит из следующих конструктов:

- 1) целевой показатель для определения суммарного объема снижения потерь в трансформаторном комплексе;
- 2) расчётная зависимость для определения суммарного объема требуемых к сокращению суммарных потерь в трансформаторном комплексе и суммарной мощности этих потерь, исходя из требуемого значения целевого показателя;
- 3) расчетная зависимость для определения удельного сокращения суммарной мощности потерь в трансформаторе;
- 4) расчетная зависимость для определения сокращения суммарной мощности потерь в трансформаторе при номинальной нагрузке;
- 5) расчетная зависимость для определения мощностей потерь x_x и k_z в трансформаторе;
- 6) расчетная зависимость для определения удельной стоимости трансформации электроэнергии для каждой номинальной мощности трансформатора;
- 7) алгоритм определения оптимальной загрузки для каждой номинальной мощности, исходя из стоимости трансформаторов и стоимости потерь.
- 8) обобщенные финансовые показатели функционирования трансформаторного комплекса.

Что касается понятия энергоэффективности самих трансформаторов, то при анализе работ, посвященных теме энергоэффективности распределительных трансформаторов, было установлено, что единого мнения в данном вопросе нет. В частности, в работе [6] автор прямо говорит, что на момент написания его статьи (2010г.) во всем мире не было четного представления о том, какой трансформатор считать энергоэффективным. Однозначное указание на то, какие трансформаторы считать энергоэффективными, содержится в Постановлении Правительства № 600 от 14.06.2017г. и в отраслевом стандарте ПАО «Россети» СТО 34.01-3.2-011-2017.

Автором рассматривались в качестве целевых показателей два возможных глобальных критерия, на величину которых оказывают прямое воздействие потери в трансформаторах: 1) изменение средней температуры земной атмосферы; 2) изменение удельной энергоёмкости внутреннего валового продукта (ВВП). В описываемой ниже математической модели и методике расчёта показателей потерь x_x и k_x применен второй критерий, поскольку он позволяет получить значения потерь с существенно большей точностью, чем первый.

Математическая модель первого критерия была использована автором для оценки степени влияния потерь в распределительных трансформаторах на глобальное

потепление климата нашей планеты. Приведенные ниже допущения позволили использовать простейшую формулу термодинамики для расчёта изменения средней температуры атмосферы Земли:

1. Модель теплового процесса в атмосфере над территорией России можно экстраполировать на остальную территорию нашей планеты.
2. Вся выделяемая распределительными трансформаторами в России за счет потерь тепловая энергия полностью расходуется на нагрев массы воздуха над территорией России. Процесс теплопередаче происходит при постоянном объеме воздуха.
3. Все распределительные трансформаторы работают с номинальной нагрузкой в течение года.

При этих допущениях для расчета изменения температуры мы можем использовать формулу:

$$\Delta Q = c * \Delta m * \Delta t, \quad (1)$$

где

ΔQ – количество тепла, выделившееся в течение года за счет потерь в трансформаторах*;

c – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме;

Δm – масса атмосферы над территорией России;

Δt - изменение температуры массы атмосферы над территорией России.

Значения величин для расчёта приведены в таблице 3.

Таблица 3.

ΔQ , Дж	c , Дж/(кг*К)	Δm , кг
$2,532 \cdot 10^{18}$	715,9	$1,7 \cdot 10^{17}$

Количество трансформаторов в России мощностью 25 – 6300 кВА, принятых в расчете, равно $3,0 \cdot 10^6$ штук (в соответствии с таблицей 1).

В результате расчета изменения температуры атмосферы за счет тепловыделения в распределительном трансформаторном комплексе составляют примерно плюс 0,02 градуса. По данным различных источников увеличение средней температуры атмосферы планеты в год составляет от 0,3 до 1,7 градуса, или если усреднить эти значения – на 1 градус. С учетом очень большого числа других факторов, которые приводят к потеплению климата нашей планеты, «вклад» 2% - это существенно. Таким образом, применение энергоэффективных трансформаторов является глобально важной задачей.

Но, как мы видим, модель изменения температуры атмосферы является грубой и приближенной. Поэтому, несмотря на то, что Парижское соглашение по климату от декабря 2015 года (которое пришло на смену Киотскому протоколу от декабря 1997 года) в подпункте а) пункта 1 статьи 2 устанавливает точное ограничение прироста глобальной средней температуры - до 1,5 градуса Цельсия в год, применение этого

критерия для расчета нормативов потерь хх и кз непрозрачно и непонятно для инвесторов. Это связано с неочевидностью, нетранспарентностью экономического/финансового «отклика» от глобального улучшения климата на вложения в инновации, которые к нему приводят.

Очень удобным в качестве целевого показателя для определения суммарного объема снижения потерь в трансформаторном комплексе является энергоёмкость ВВП (или ВРП).

Алгоритм получения нормативных значений энергоэффективных потерь хх и кз трансформаторов, составляющих трансформаторный комплекс, следующий.

1. Задается требуемое сокращение энергоёмкости ВВП. Это конкретное значение сокращения энергоёмкости ВВП в т.у.т. на миллион руб. пересчитывается (через значение ВВП и коэффициент пересчета т.у.т. в кВт*час) в количество требуемой к сокращению энергии (в год).

$$\Delta W_{\Sigma} = \frac{V * \Delta \varepsilon}{0,3445}.$$

2. Далее эта величина преобразуется в суммарную сокращаемую мощность потерь.

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{\Delta W_{\Sigma}}{8760}.$$

3. Рассчитывается удельная сокращаемая мощность потерь (сокращаемое количество мощности потерь на 1 кВА мощности трансформатора). Для этого полученная суммарная сокращаемая мощность потерь делится на суммарную мощность трансформаторного комплекса.

$$\Delta P^{уд} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}.$$

4. Для каждой мощности определяется мощность суммарных потерь (потери хх плюс потери кз) умножением удельной мощности на номинальную мощность.
5. Величины мощности потерь хх и кз для каждой номинальной мощности трансформатора определяются на основе среднего значения опытного коэффициента соотношения потерь хх и кх.

$$P_{хх} = \Delta P^{уд} * S_i * k_{хх}.$$

$$P_{кз} = \Delta P^{уд} * S_i * k_{кз}.$$

Доля, «вносимая» на текущий момент потерями в распределительных трансформаторах (включая трансформаторы мощностью 4000 кВА и 6300 кВА) в энергоёмкость ВВП составляет по расчётам автора ~ 2,9%,. Однако описанная модель

позволяет выбирать любое значение целевого показателя – любое значения снижения энергоёмкости ВВП.

Для тестовых расчетов был принято целевое значение сокращения энергоёмкости ВВП в год на 0,08 т.у.т./млн.руб. Значения промежуточных показателей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения промежуточных показателей для определения энергоэффективных потерь хх и кз.

Показатель	Значение
Общее количество распределительных трансформаторов в РФ, штук, N_{Σ}	3 020 649
Суммарная трансформаторная мощность, МВА, S_{Σ}	846 472
Суммарные потери (при загрузке, равной 1), кВт, P_{Σ}	10 737 243
Целевое значение сокращения энергоёмкости ВВП, т.у.т./млн.руб., $\Delta \mathcal{E}$	0,08
Значение суммарной доли подлежащих сокращению потерь, кВт*час, ΔW_{Σ}	21 375 000 000
Значение суммарной мощности подлежащих сокращению потерь, кВт, ΔP_{Σ}	2 440 000
Удельное значение сокращаемых потерь, кВт/кВА, $\Delta P^{уд}$	0,002882
Доля потерь хх в общей мощности потерь, k_{xx}	0,12726
Доля потерь кз в общей мощности потерь, $k_{кз}$	0,87274

Значения полученных энергоэффективных потерь хх и кз для каждой номинальной мощности всей линейки трансформаторов от 25 кВА до 6300 кВА приведены в таблице 5.

В таблицах 6, 7, 8 приведены соответственно значения потерь хх и кз энергоэффективных трансформаторов в соответствии с Постановлением Правительства № 600 от 17 июня 2015г., Стандартом СТО 34.01-3.2-011-2017 и постановлением Совета Европы № 548/2014 от 21 мая 2014г.

Завершает модель энергоэффективности трансформаторного комплекса конструкт по расчету удельной стоимости трансформации электроэнергии. Формула для расчета удельной стоимости трансформации приведена ниже:

$$C_{уд}^{тр} = \frac{C_{тр} * 0,15 + C_{потерь} * (p_{xx} + \alpha^2 * p_{кз}) * 8760}{\alpha * S_{тр}},$$

где

$C_{уд}^{тр}$ – удельная стоимость трансформации электроэнергии;

$C_{тр}$ – стоимость трансформатора, руб.;

$C_{потерь}$ – стоимость потерь, руб./квт*час;

p_{xx} – мощность потерь xx, кВт;

α – коэффициент загрузки трансформаторов;

$p_{кз}$ – мощность потерь кз, кВт;

$S_{тр}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Исходные данные и результаты расчета приведены в таблицах 9 и 10, а также на рисунках 1 и 2.

Как видно из таблиц 9, 10 и из рисунков 1 и 2, минимум стоимости трансформации электроэнергии для энергоэффективных трансформаторов ожидаемо смещается в сторону больших нагрузок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По итогам проведенных лично автором исследований получены следующие научные результаты:

- I. Для решения задач повышения эффективности функционирования и управления эксплуатацией выделена как некая целостность совокупность всех распределительных трансформаторов, находящихся в границах административно-территориальной единицы – ТЕХНОЦЕНОЗ. Эта целостность (техноценоз) названа автором ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС («ТТРК»). При этом отдельный трансформатор рассматривается как особь. Трансформаторы одной номинальной мощности представляют один вид. Все трансформаторы одной мощности в ТТРК составляют популяцию. Количество трансформаторов одной мощности – мощность популяции. Структура ТТРК представляется как упорядоченный список количества трансформаторов, расположенных в порядке уменьшения мощности популяций. Номер популяции (вида) называется рангом и является порядковым номером популяции в списке.
- II. При исследовании структуры ТТРК, как некой целостности, выявлена закономерность, которая заключается в убывании количества распределительных трансформаторов одинаковой мощности при увеличении мощности трансформатора (трансформаторов большой мощности – мало, трансформаторов меньшей мощности – много).
- III. Для математического описания структуры ТТРК использовано известное ранговое распределение гиперболического типа, для которого найдено

численное значение показателя степени в математической записи распределения и сформулирована методика расчета константы распределения (численность популяции первого ранга – наибольшее количество трансформаторов одной мощности). Адекватность математической модели структуры ТТРК проверена тестовым расчётом общего количества распределительных трансформаторов в РФ на основе суммарного электропотребления в России.

- IV. Полученное математическое описание структуры ТТРК было использовано для прогноза потребного количества трансформаторов разных мощностей, необходимое для установки при увеличении электропотребления в ТТРК.
- V. Предложено упрощенное математическое описание количественной взаимосвязи суммарных потерь, производимых в силовых и распределительных трансформаторах на территории всей страны, с изменением глобальных геофизических параметров.
- VI. Предложено математическое описание количественной взаимосвязи суммарных потерь, производимых в силовых и распределительных трансформаторах на территории всей страны, с энергоёмкостью внутреннего валового продукта. Определена доля трансформаторных потерь в энергоёмкости ВВП.
- VII. Предложена методика нормирования параметров энергоэффективности распределительных трансформаторов (потерь холостого хода и короткого замыкания) на основе требований по сокращению энергоёмкости ВВП с использованием количественной взаимосвязи потерь и энергоёмкости ВВП.
- VIII. Исследована зависимость минимума удельной стоимости трансформации от коэффициента загрузки трансформаторов в составе ТТРК на базе математической модели структуры ТТРК.
- IX. Исследована двухфакторная зависимость минимальной удельной стоимости трансформации электроэнергии от коэффициента загрузки и от параметров энергоэффективности трансформаторов (потерь холостого хода и короткого замыкания). Показано, что минимум удельной стоимости трансформации электроэнергии смещается в сторону больших коэффициентов загрузки при улучшении энергоэффективности трансформаторов (при сокращении потерь xx и $kз$).

Уважаемые коллеги!

Вам был доложен материал по новому взгляду на трансформаторные комплексы как на целостность, состоящую из различных объектов, создаваемую под единую цель – электроснабжение потребителей. Именно такой онтологический взгляд позволил получить представленные данные. Надеюсь, эти скромные результаты в дальнейшем также будут способствовать инновационному развитию электроэнергетики нашей страны.

Спасибо за внимание.

Таблица 2. Потенциал энергосбережения в России

Мощность, кВА	Штук	Рхх, Вт обычные	Суммарные потери, Вт. ОБЫЧНЫЕ трансформаторы	Рхх, Вт энергоэфф. Х2	Суммарные потери, Вт. ЭНЕГОЭФФ. трансформаторы	Ркз, Вт ОБЫЧНЫЕ	Суммарные потери КЗ, Вт ОБЫЧНЫЕ трансформаторы	Ркз, Вт э/эфф К2	Суммарные потери КЗ, Вт ЭНЕРОЭФФ. трансформаторы
25	1399732	115	1410090017	115	1410090017	600	7356991392	600	7356991392
40	515895	155	700482842	155	700482842	880	3976934845	880	3976934845
63	287733	220	554519817,4	160	403287139,9	1280	3226297119	1270	3201091673
100	190142	270	449724320,4	217	361445101,9	1970	3281321893	1591	2650042199
160	137889	410	495240379,8	300	362371009,6	2650	3200943918	2136	2580081588
250	106049	530	492364879	425	394820893,5	3700	3437264249	2955	2745166448
400	84938	870	647331994,3	565	420393766,4	5600	4166734676	4182	3111657931
630	70080	1240	761239125	696	427276154,1	7600	4665659153	6136	3766905864
1000	59147	1600	829009994,8	957	495851603,2	10800	5595817465	9545	4945562750
1600	50821	2100	934906743,2	1478	657996269,8	16500	7345695840	15455	6880468437
2500	44304	2750	1067274725	2130	826652787,1	27000	10478697301	23182	8996931883
4000	39086	4000	1369581858	3600	1232623672	34400	11778403979	31000	10614259399
6300	34831	5400	1647647600	4900	1495087637	46500	14188076553	42000	12815036887
ИТОГО	3020649		11359414295,61		9188378893,26		82698838384,50		73641131296,43
		Суммарные потери в руб.	22 718 828 591,21 ₽	Суммарные потери в руб.	18 376 757 786,53 ₽	Суммарные потери в руб.	165 397 676 768,99 ₽	Суммарные потери в руб.	147 282 262 592,86 ₽
ОБЪЕМ ПОТЕРЬ В ФИНАНСОВОМ ВЫРАЖЕНИИ									103 763 690 208,02 ₽
ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА КЛАСС ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ Х2К2 В ФИНАНСОВОМ ВЫРАЖЕНИИ									13 218 623 750,99 ₽

Таблица 5. Значения потерь энергоэффективных трансформаторов в сравнении с обычными мощностью 25 кВА – 6300 кВА.

Мощность трансформатора, кВА	Сокращение удельной мощности суммарных потерь, Вт	Мощность потерь хх, Э-ЭФ. тр-ров, Вт	Мощность потерь хх ОБЫЧНЫХ тр-ров, Вт	Мощность потерь кз, Э-ЭФ. тр-ров, Вт	Мощность потерь кз ОБЫЧНЫХ тр-ров, Вт
25	0,0721	103,4	115	539,5	600
40	0,1153	137,7	155	782,0	880
63	0,1816	193,4	220	1125,0	1280
100	0,2883	235,3	270	1716,5	1970
160	0,4612	348,2	410	2250,6	2650
250	0,7206	439,7	530	3069,7	3700
400	1,1530	715,0	870	4602,0	5600
630	1,8160	985,3	1240	6038,7	7600
1000	2,8826	1228,1	1600	8289,4	10800
1600	4,6121	1579,3	2100	12408,6	16500
2500	7,2064	2083,9	2750	20459,8	27000
4000	11,5302	2798,9	4000	24070,9	34400
6300	18,1601	3510,5	5400	30229,4	46500

Таблица 6. Значения потерь хх и кз энергоэффективных силовых трансформаторов в соответствии с Постановлением Правительства № 600 от 17 июня 2015 года.

Номинальная мощность трансформатора, кВА	Энергоэффективные трансформаторы	
	Требования к мощности потерь холостого хода, не более, Вт	Требования к мощности потерь короткого замыкания, не более, Вт
100	250	1750
160	375	2350
250	530	3250
400	650	4600
630	800	6750
1000	1100	10500
1600	1700	17000
2500	2450	25500

Таблица 7. Значения потерь хх и кз энергоэффективных распределительных трансформаторов в соответствии со Стандартом СТО 34.01-3.2-011-2017 от 12 апреля 2017 года

Номинальная мощность (кВА)	Энергоэффективные трансформаторы		Высокоэнергоэффективные трансформаторы	
	Потери холостого хода (Вт) X2	Потери короткого замыкания (Вт) K2	Потери холостого хода (Вт) X3	Потери короткого замыкания (Вт) K3
63	160	1270	128	1031
100	217	1591	180	1475
160	300	2136	260	2000
250	425	2955	360	2750
400	565	4182	520	3850
630	696	6136	730	5600
1000	957	9545	940	9000
1250	1350	13250	1150	11000
1600	1478	15455	1450	14000
2500	2130	23182	2100	22000

Таблица 8. Значения потерь энергоэффективных трансформаторов в соответствии с постановлением Совета Европы от 21 мая 2014 года.

Ном. мощность, кВА	Вводятся с 1 июля 2015 г.		Вводятся с 1 июля 2021 г.	
	Потери х.х., Вт	Потери к. з., Вт	Потери х.х., Вт	Потери к. з., Вт
≤ 25	Ao (70)	Ck (900)	Ao-10% (63)	Ak (600)
50	Ao (90)	Ck (1100)	Ao-10% (81)	Ak (750)
100	Ao (145)	Ck (1750)	Ao-10% (130)	Ak (1250)
160	Ao (210)	Ck (2350)	Ao-10% (189)	Ak (1750)
250	Ao (300)	Ck (3250)	Ao-10% (270)	Ak (2350)
315	Ao (360)	Ck (3900)	Ao-10% (324)	Ak (2800)
400	Ao (430)	Ck (4600)	Ao-10% (387)	Ak (3250)
500	Ao (510)	Ck (5500)	Ao-10% (459)	Ak (3900)
630	Ao (600)	Ck (6500)	Ao-10% (540)	Ak (4600)
800	Ao (650)	Ck (8400)	Ao-10% (585)	Ak (6000)
1000	Ao (770)	Ck (10500)	Ao-10% (693)	Ak (7600)
1250	Ao (950)	Bk (11000)	Ao-10% (855)	Ak (9500)
1600	Ao (1200)	Bk (14000)	Ao-10% (1080)	Ak (12000)
2000	Ao (1450)	Bk (18000)	Ao-10% (1305)	Ak (15000)
2500	Ao (1750)	Bk (22000)	Ao-10% (1575)	Ak (18500)
3150	Ao (2200)	Bk (27500)	Ao-10% (1980)	Ak (23000)

Таблица 9. Исходные данные и удельная стоимость трансформации для обычных трансформаторов.

			Коэфф. загрузки	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Цена тр-ра, руб.	Мощность, кВА	Мощность потерь хх, Вт	Мощность кз, Вт												
78000,00	25,00	115,00	600,00	5527,97	2827,06	1954,78	1539,67	1307,42	1166,61	1078,04	1022,12	987,98	969,07	961,25	961,74
87000,00	40,00	155,00	880,00	3979,94	2047,79	1429,43	1139,53	981,00	888,16	832,87	801,03	784,83	779,58	782,29	790,98
98000,00	63,00	220,00	1280,00	2980,74	1543,76	1088,50	878,67	767,01	704,43	669,91	652,91	647,60	650,48	659,30	672,58
105000,00	100,00	270,00	1970,00	2082,55	1093,05	786,22	650,07	582,18	548,43	534,18	532,12	538,19	549,95	565,84	584,84
139000,00	160,00	410,00	2650,00	1781,09	934,07	671,08	554,09	495,50	466,12	453,42	451,15	455,83	465,38	478,47	494,22
178000,00	250,00	530,00	3700,00	1465,35	771,57	557,60	463,57	417,53	395,48	387,14	387,36	393,30	403,24	416,08	431,11
220000,00	400,00	870,00	5600,00	1230,59	652,09	475,60	399,63	363,85	348,18	343,99	346,98	354,76	365,89	379,45	394,84
286000,00	630,00	1240,00	7600,00	1046,93	555,17	405,34	340,99	310,83	297,78	294,49	297,31	304,19	313,93	325,74	339,11
476000,00	1000,00	1600,00	10800,00	1013,24	535,00	388,20	324,27	293,47	279,25	274,50	275,66	280,77	288,65	298,53	309,92
767000,00	1600,00	2100,00	16500,00	967,08	510,64	370,54	309,52	280,14	266,57	262,05	263,17	268,05	275,58	285,02	295,89
1245000,00	2500,00	2750,00	27000,00	958,64	507,70	370,00	310,62	282,55	270,15	266,70	268,84	274,71	283,19	293,57	305,37
2192000,00	4000,00	4000,00	34400,00	1012,27	528,73	377,60	309,57	274,78	256,60	247,93	245,19	246,40	250,39	256,39	263,91
2871000,00	6300,00	5400,00	46500,00	846,67	442,73	316,71	260,16	231,41	216,55	209,63	207,67	209,02	212,69	218,04	224,66

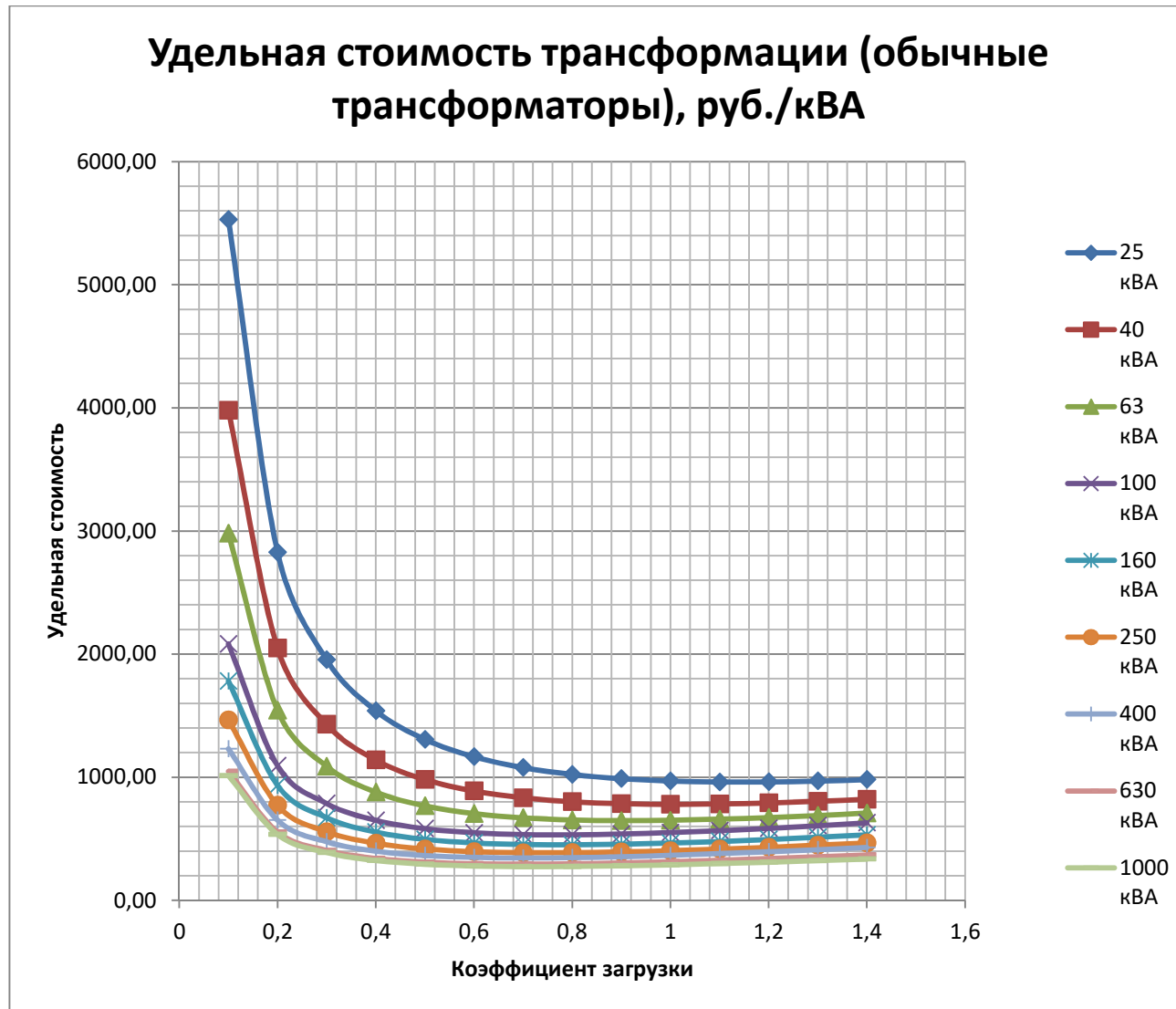


Рисунок 1. График удельной стоимости трансформации для обычных трансформаторов.

Таблица 10. Исходные данные и значения удельной стоимости трансформации для энергоэффективных трансформаторов

	Коэфф. Загрузки			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Цена тр-ра, руб.	Мощность, кВА	Мощность потерь хх, Вт	Мощность кз, Вт												
117000,00	25,00	115	600	7867,97	3997,06	2734,78	2124,67	1775,42	1556,61	1412,32	1314,62	1247,98	1203,07	1173,98	1156,74
130500,00	40,00	155	880	5611,19	2863,41	1973,18	1547,34	1307,25	1160,04	1065,90	1004,93	966,08	942,71	930,59	926,92
147000,00	63,00	160	1270	3980,27	2043,11	1420,94	1127,51	965,58	869,40	810,79	775,66	756,19	747,68	747,13	752,56
157500,00	100,00	217	1591	2770,56	1427,09	997,85	797,17	687,91	624,36	586,93	565,83	555,61	553,01	555,95	563,05
208500,00	160,00	300	2136	2306,58	1188,37	831,23	664,35	573,58	520,87	489,89	472,51	464,19	462,21	464,84	470,94
267000,00	250,00	425	2955	1920,55	991,34	695,41	557,79	483,51	440,89	416,37	403,15	397,47	397,07	400,51	406,82
330000,00	400,00	565	4182	1503,29	779,12	549,94	444,51	388,58	357,40	340,36	332,16	329,85	331,67	336,49	343,55
429000,00	630,00	696	6136	1232,05	641,62	456,19	372,00	328,32	304,88	293,02	288,38	288,57	292,14	298,16	306,02
714000,00	1000,00	957	9545	1255,39	652,78	463,06	376,56	331,35	306,78	294,01	288,62	288,14	291,10	296,56	303,90
1150500,00	1600,00	1478	15455	1257,36	654,06	464,25	377,80	332,70	308,28	295,67	290,44	290,14	293,28	298,92	306,45
1867500,00	2500,00	2130	23182	1286,02	667,38	471,99	382,43	335,18	309,10	295,12	288,69	287,30	289,44	294,14	300,77
3288000,00	4000,00	3600	31000	1404,26	722,50	504,29	401,98	346,03	313,25	293,71	282,46	276,72	274,85	275,78	278,83
4306500,00	6300,00	4900	42000	1173,30	604,17	422,25	337,13	290,72	263,68	247,71	238,64	234,19	232,96	234,08	236,96

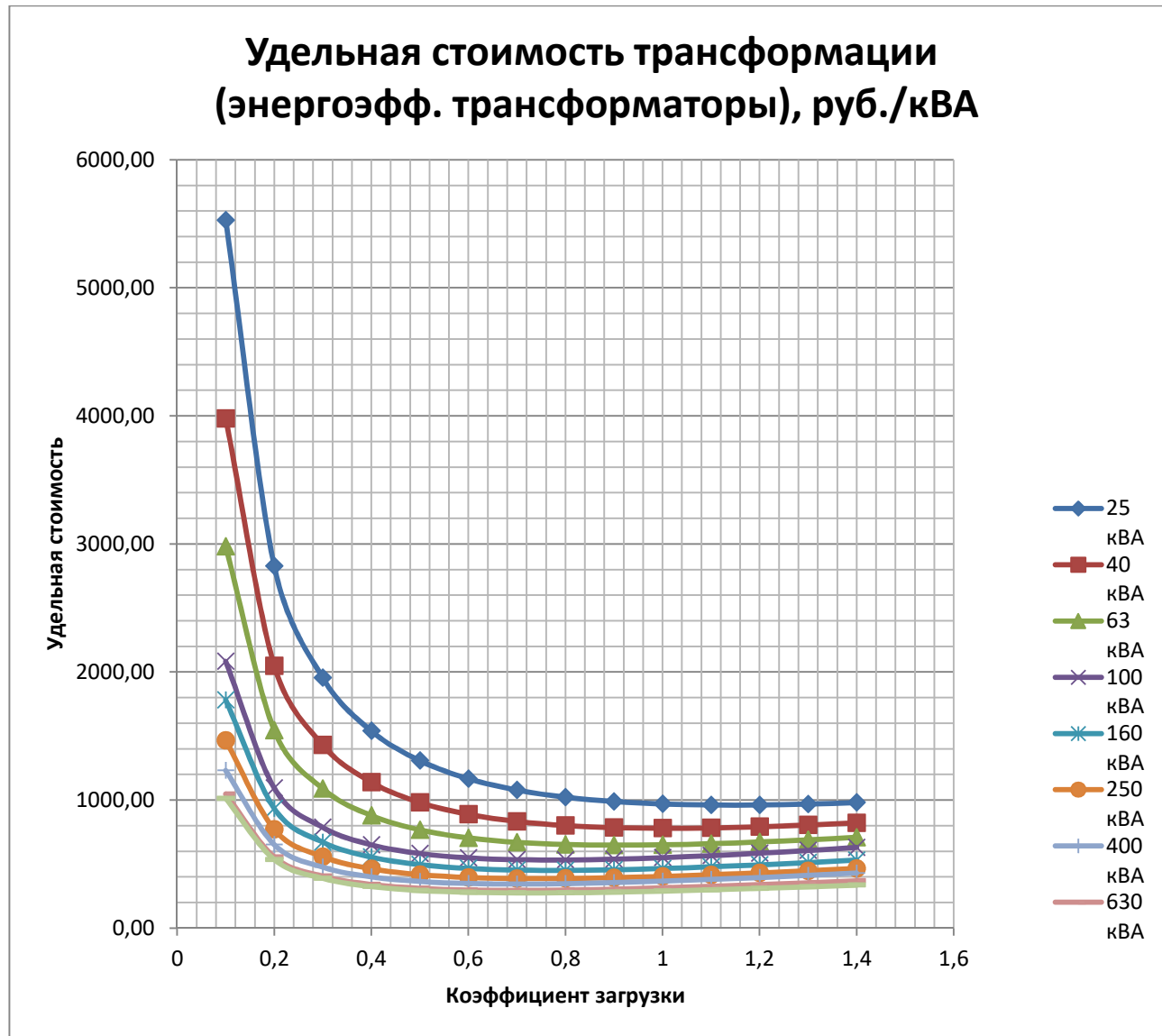


Рисунок 2. График удельной стоимости трансформации для энергоэффективных трансформаторов.

Список литературы

1. Кудрин Б.И. Два открытия: явление инвариантности структуры техноценозов и закон информационного отбора / Кудрин Б.И. – М. – Технетика, - 2009 г. – 82 С.
2. Кудрин Б.И. Математика ценозов: видовое, ранговидовое, ранговое по параметру гиперболические Н-распределения и законы Лотки, Ципфа, Парето, Мандельброта // Философские основания технетики: III. Математический аппарат структурного описания ценозов и гиперболические Н-ограничения. Вып. 19. "Ценологические исследования". - М.: Центр системных исследований, 2002. - С.357-412.
3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для ВУЗов. – 5-е изд. перераб. и доп.// Энергоатомиздат. – 1986. - 528с.
4. Федосенко Р.Я. Трансформатор в местной распределительной сети / Радий Яковлевич Федосенко. – М. – Издательств Министерства коммунального хозяйства РСФСР. – 1963. – 87с.
5. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. [Электронный ресурс]. URL: <http://gnatukvi.ru/ind.html> (Дата обращения 17.12.2019).
6. Гура, К. Ю. Энергоэффективные распределительные трансформаторы [Текст] / К. Ю. Гура // Электрик. – 2010. – № 1-2. – С. 18-21.