

МЕТОД ВЫБОРА НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Дуль* И.И., Фурсанов М.И.

Введение

Известно, что одними из основных элементов электрической части энергосистемы являются силовые трансформаторы, надежность работы которых непосредственно сказывается на надежности энергосистемы. Но в существующей практике проектирования встречаются случаи выбора номинальной мощности силовых масляных трансформаторов по упрощенному классическому методу [1, 2]. Он предназначен для выбора мощности трансформатора на двухтрансформаторной подстанции и рассматривает режим работы при аварийном отключении одного из трансформаторов. Суть его состоит в учете допустимой нагрузки в аварийном режиме с помощью коэффициента перегрузки по формуле:

$$\text{---} \quad (1)$$

где $S_{ав}$ – максимальная нагрузка подстанции в аварийном режиме с учетом возможного резервирования ее части по сетям низкого напряжения;
 $S_{н}$ – номинальная мощность трансформатора.

В классическом методе по умолчанию приняты исходные условия, в рамках которых данный метод является верным. Однако в настоящее время все чаще встречаются проектные задачи, в которых реальные условия несопоставимы с принятыми в классическом методе.

В данной работе предложен усовершенствованный метод выбора номинальной мощности силовых трансформаторов. Он разработан на основе анализа действующих стандартов, нормативно-технических документов и рекомендаций по выбору мощности трансформаторов. В качестве исходных данных он использует:

- форму графика электрических нагрузок с учетом неопределенности формы и сезонных изменений;
- температуру окружающей среды с учетом неопределенности как отдельных значений, так и сезонных изменений температуры;
- параметры систем охлаждения трансформаторов;
- возможные допустимые аварийные перегрузки.

Требования нормативно-технических документов

Как показано в [3, 4], выбор номинальной мощности силовых масля-

* РУП «Белэнергосетьпроект», Минск, Беларусь, IvanDul88@gmail.com

ных трансформаторов может осуществляться по техническому критерию допустимости аварийной перегрузки. Однако коэффициент допустимой аварийной перегрузки следует определять более тщательно. Согласно общим техническим условиям на силовые масляные трансформаторы общего назначения [5, 6], допустимые нагрузки для трансформаторов мощностью до 100 МВА нормируются стандартом [7], требования которого шире чем в классическом методе и предусматривают ряд дополнительных условий.

Согласно [7] допустимая нагрузка трансформаторов должна определяться с учетом параметров приведенных в табл. 1.

Таблица 1. Параметры, влияющие на допустимую нагрузку трансформатора

Параметры, учитываемые ГОСТ 14209-85 [7]	Значения параметров принятые по умолчанию в классическом методе
продолжительность перегрузки	6 ч.
температура окружающей среды	20 ⁰ С
форма графика электрических нагрузок	предшествующая нагрузка не более 0,93 о.е.
параметры теплоотдачи трансформатора	не учитывается

В отличие от классического метода ГОСТ 14209-85 [7] допускает коэффициент аварийной перегрузки от 1,1 до 2,0 при вариации условий эксплуатации. В настоящее время существуют и другие документы [8–11], предлагающие осуществлять выбор номинальной мощности силовых масляных трансформаторов способами, отличными от классического метода [3]. Однако их требования основаны на ГОСТ 14209-85 [7]. Отметим, что Международной электротехнической комиссией предусмотрен стандарт [12] регламентирующий нагрузочную способность силовых масляных трансформаторов, рекомендации которого могут быть применимы для силовых трансформаторов любой мощности.

На основании изложенного можно утверждать, что в общем случае нагрузочную способность силовых масляных трансформаторов следует определять в соответствии с требованиями [7] или [12], в частном случае, при условиях указанных в табл. 1, нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов может быть проверена по классическому методу.

Допустимая нагрузка трансформаторов

В соответствии с [7], в качестве наиболее точного и универсального метода определения допустимых нагрузок трансформаторов рекомендуется применять метод расчета тепловых переходных процессов, используемый и в [12].

Необходимость в выполнении расчета тепловых переходных процессов обусловлена снижением прочности изоляции масляного трансформатора при повышении температуры его элементов. Снижение электрической прочности вызвано выделением пузырьков газа в местах с высокой электростатической напряженностью, т.е. в обмотках и соеди-

нениях. В бумажной изоляции трансформаторов пузырьки газа начинают выделяться по мере превышения допустимых значений температуры. Поэтому чем выше температура обмоток или масла трансформатора, тем выше вероятность его отказа.

Таким образом, требования о допустимости любого режима работы трансформатора наиболее точно могут быть выражены в виде допустимых температур характерных критических точек в трансформаторе. Коэффициенты допустимой перегрузки, используемые в упрощенных методах, являются лишь косвенно определенными величинами.

Допустимые значения температуры характерных критических точек в трансформаторе регламентируются [7] либо [12].

В качестве примера, на рис. 1 приведен результат расчета тепловых переходных процессов в трансформаторе. На рис. 1 а) дан график электрических нагрузок и температура окружающей среды, а на рис. 1 б) представлены результаты расчета в виде графиков изменения температуры критических точек трансформатора во времени.

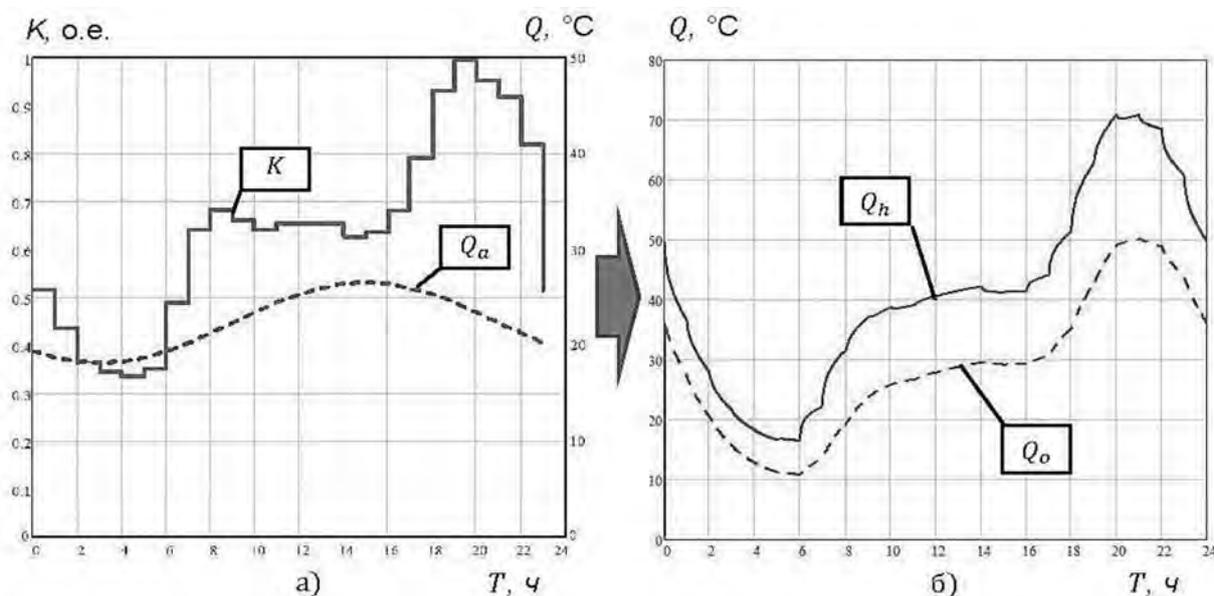


Рис. 1. – Исходные данные и результат расчета тепловых переходных процессов в трансформаторе

- коэффициент нагрузки трансформатора;
- температура охлаждающего воздуха;
- температура верхних слоев масла при допустимом значении 115 С;
- температура наиболее нагретой точки обмотки при допустимом значении 160 С.

Суть расчета тепловых переходных процессов в трансформаторе представлена диаграммой, приведенной на рис. 2.

Метод расчета нагрузочной способности трансформаторов на основе тепловых переходных процессов является универсальным и может быть применим для силовых трансформаторов любой мощности [12].

Расчет номинальной мощности трансформаторов

В качестве базового критерия экономической эффективности принят чистый дисконтированный доход (ЧДД) [2, 14]. Однако, для исключения недостающих параметров выполнено расчет стоимости пере-

дачи электроэнергии, при которой экономический эффект является отрицательным. Одна из форм такого критерия имеет вид:

$$\frac{\dots}{\dots} \quad (2)$$

где: C_{tr} – стоимость трансформации электроэнергии, при которой ЧДД равен нулю; C_{re} – стоимость реализации электроэнергии; C_{inv} – единовременные капиталовложения в оборудование; α – коэффициент ежегодных отчислений на эксплуатацию; β – норма дисконтирования разновременных денежных потоков; τ_{no} – потери холостого хода; τ_{sc} – потери короткого замыкания; $\tau_{yr} = 8760$ – длительность года в часах; T_{tr} – срок службы трансформатора; t_{max} – время наибольшей нагрузки, вычисленное для расчетного графика электрических нагрузок; t_{loss} – время наибольших потерь, вычисленное для расчетного графика электрических нагрузок; β_{max} – коэффициент наибольшей нагрузки.

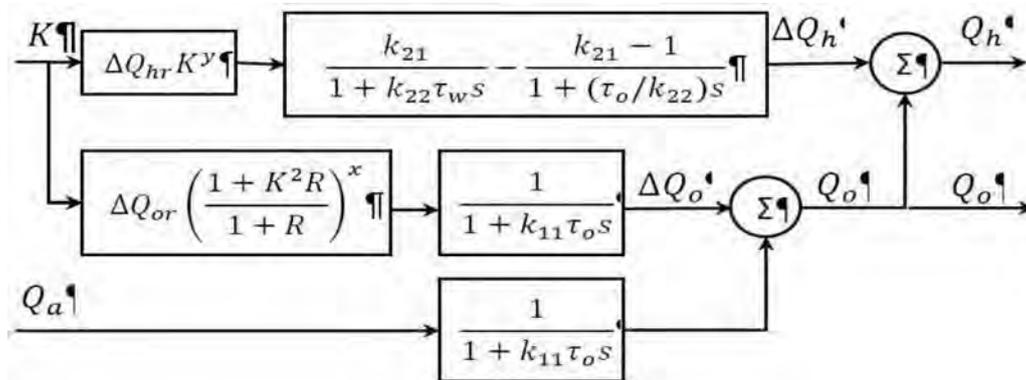


Рис. 2 – Диаграмма дифференциальных вычислений для расчета тепловых переходных процессов в трансформаторе

β – коэффициент нагрузки трансформатора; T_{tr} – температура охлаждающей среды; τ_{no} – превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла; τ_{sc} – показатель степени для расчета температуры наиболее нагретой точки обмотки; τ_{yr} – превышение температуры масла над температурой охлаждающей среды; τ_{loss} – отношение потерь короткого замыкания и потерь холостого хода; τ_{max} – показатель степени для расчета температуры масла; τ_{tr} – тепловая постоянная времени обмотки; τ_{tr} – тепловая постоянная времени трансформатора; β_{max} – коэффициенты характеризующие систему охлаждения трансформатора; t_{max} – температура наиболее нагретой точки обмотки; t_{loss} – температура верхних слоев масла.

Формула для определения коэффициента наибольшей нагрузки имеет вид:

$$\dots \quad (3)$$

где Q_{max} – наибольшая (максимальная) нагрузка на трансформатор для графика электрических нагрузок в нормальном режиме для всего расчетного периода; S_{nom} – расчетная номинальная мощность трансформатора, которую необходимо определить.

Таким образом, определение номинальной мощности трансформатора по критерию экономической эффективности сводится к подбору такого значения расчетной номинальной мощности, при котором стоимость трансформации электроэнергии () будет минимальной.

На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости стоимости трансформации электроэнергии от коэффициента наибольшей нагрузки.

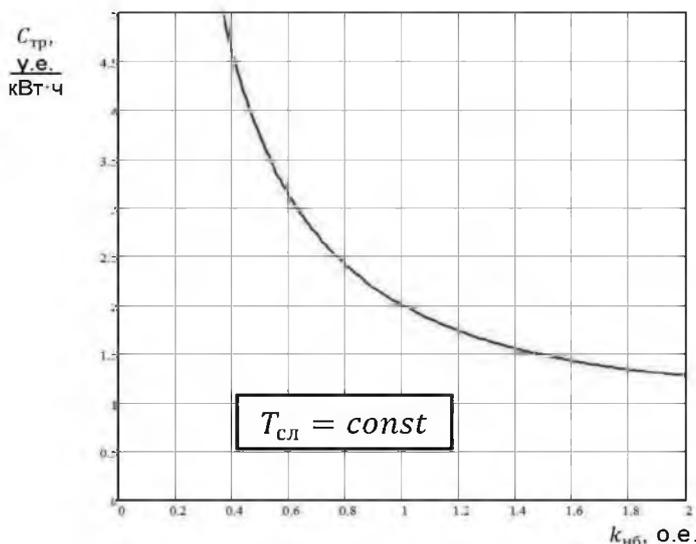


Рис. 3. – График зависимости стоимости трансформации от коэффициента наибольшей нагрузки.

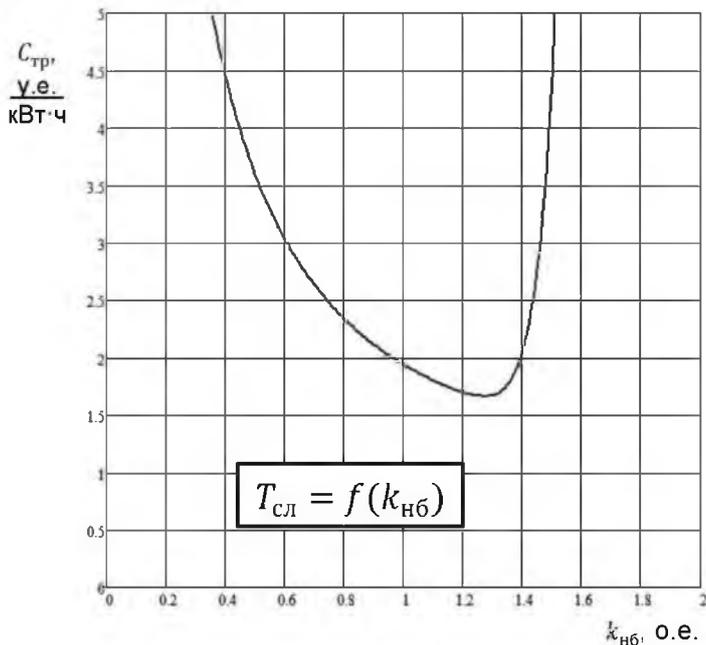


Рис. 4. – Зависимость стоимости трансформации от коэффициента наибольшей нагрузки с учетом изменения срока службы трансформатора.

Однако, в приведенных выше результатах расчета не учтено изменение срока службы трансформатора из-за более интенсивной его эксплуатации при повышении нагрузки ().

Аналогичные результаты расчета стоимости трансформации электроэнергии, но с учетом изменения срока службы трансформатора ввиду более интенсивной его эксплуатации приведены на рис. 4. Отметим, что график получен при учете в (2) зависимости срока службы трансформатора от коэффициента наибольшей нагрузки ().

Наиболее существенное влияние на срок службы масляного трансформатора оказывает тепловое старение изоляции обмоток [12]. Относительная скорость теплового старения целлюлозной изоляции трансформатора выражается в соответствии с [7, 12]:

$$\text{---} \quad (4)$$

где --- – относительная скорость старения, номинальная скорость старения принята равной 1 при температуре 98 С.

Относительная скорость старения характеризуется изменением срока службы трансформатора по отношению к нормальному сроку при нормальных условиях на рассматриваемом отрезке времени.

Результаты расчета зависимости срока службы трансформатора от

коэффициента наибольшей нагрузки (), приведенные на рис. 5, учитывают форму графика электрической нагрузки (аналогично рис. 1). В том числе они учитывают ее сезонные изменения (летом меньше). Однако, для наглядного представления степени загруженности трансформатора использована характеристика в виде одной точки – коэффициента наибольшей нагрузки (). Определение его возможно по приведенной выше формуле (3). В расчетах принято, что форма графика электрических нагрузок постоянна, однако для получения каждого значения срока службы трансформатора меняется расчетное значение номинальной его мощности , формула (3).

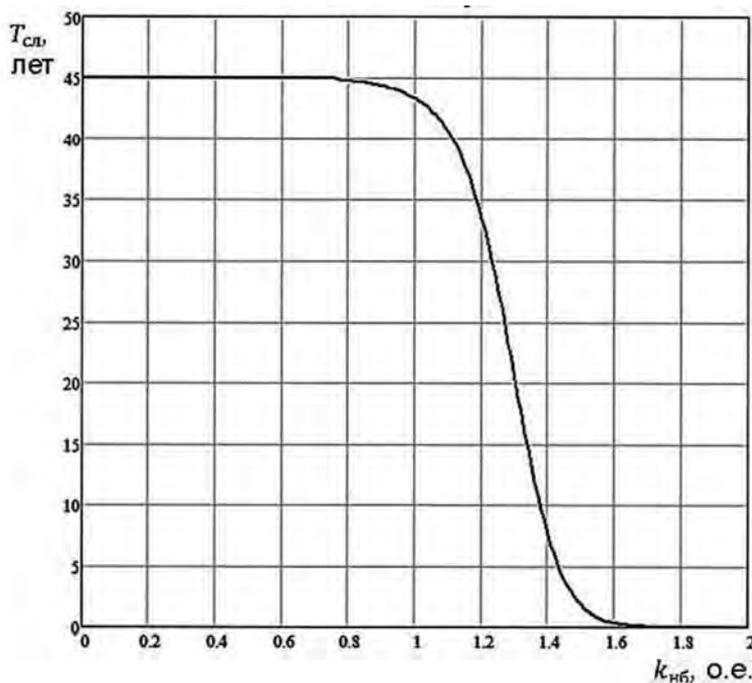


Рис. 5. – Зависимость срока службы трансформатора от коэффициента наибольшей нагрузки ().

Результаты расчета, представленные на рис. 5, получены при следующих условиях:

- трансформатор 110 кВ с системой охлаждения ДЦ;
- номинальный срок службы трансформатора при нормальных условиях эксплуатации принят 25 лет [5];
- предельный срок службы ограничен 45 годами [15], в виду наличия неучтенных факторов сокращения ресурса трансформатора;
- форма графика электрической нагрузки аналогична приведенной на рис. 1 (при расчете график нагрузки масштабируется в соответствии с изменением расчетного значения номинальной мощности трансформатора , формула (3);
- учтены сезонные изменения наибольшей нагрузки;
- учтены суточные и сезонные изменения температуры окружающей среды.

Учет неопределенности исходных данных

Предлагаемый метод выбора номинальной мощности силовых

трансформаторов разработан на достаточно точной математической модели. Однако точность ее нивелируется неопределенностью исходных данных. Для дальнейшего совершенствования метода предусмотрен учет неопределенности исходных данных. Наибольшую неопределенность при этом вносят графики электрических нагрузок и температура окружающей среды..

Пример, показывающий неопределенность формы графика электрических нагрузок и неопределенность графика температуры окружающей среды приведен на рис. 6. Неопределенность заключается в том, что не известно, какая именно кривая из всего множества, заключенного между верхней и нижней границами множества кривых (рис. 6), будет иметь место в действительности.

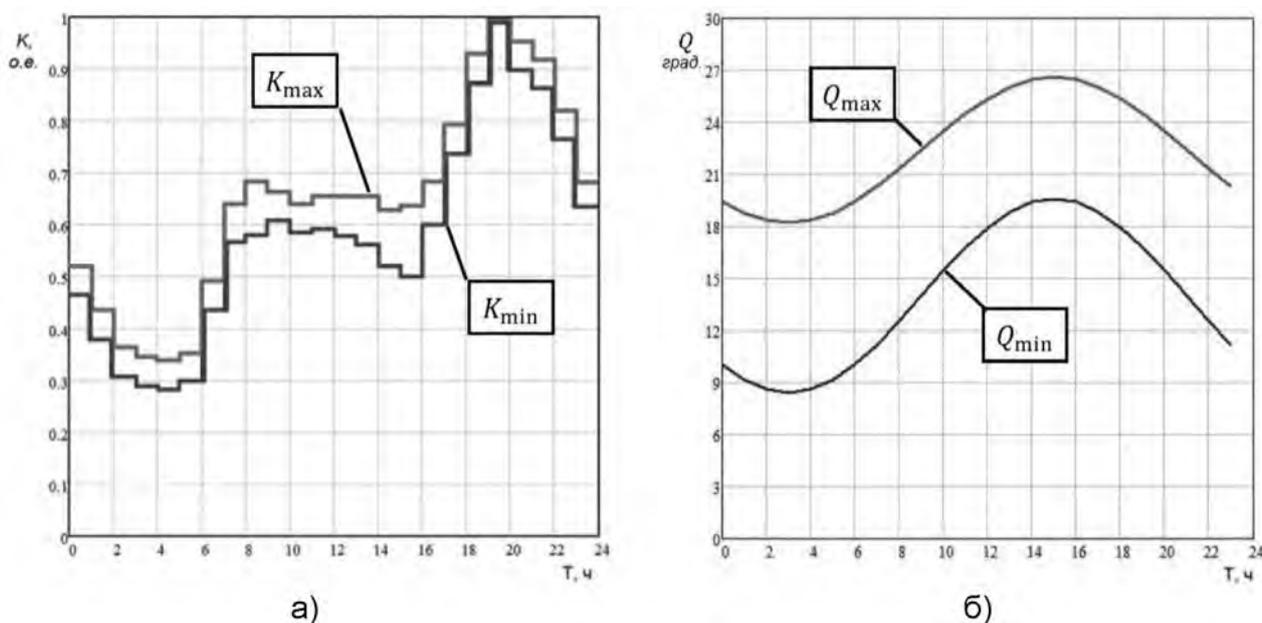


Рис. 6. – Границы множества графиков электрических нагрузок – а) и множества графиков температуры окружающей среды – б).

При учете всех значений исходных данных находящихся во множестве кривых (рис. 6), получим множество кривых, характеризующих экономический эффект для всех сочетаний исходных данных. Результат расчетов, характеризующих неопределенность экономического эффекта, обусловленную неопределенностью исходных данных, приведен на рис. 7.

Отметим, что эти результаты получены на основе исходных данных приведенных на рис. 6, а также при условиях, принятых при расчете графика (рис. 5). Полученные значения границ интервала соответствуют экономически эффективной загрузки трансформатора и являются допустимыми по результатам проверки в соответствии с [7, 12].

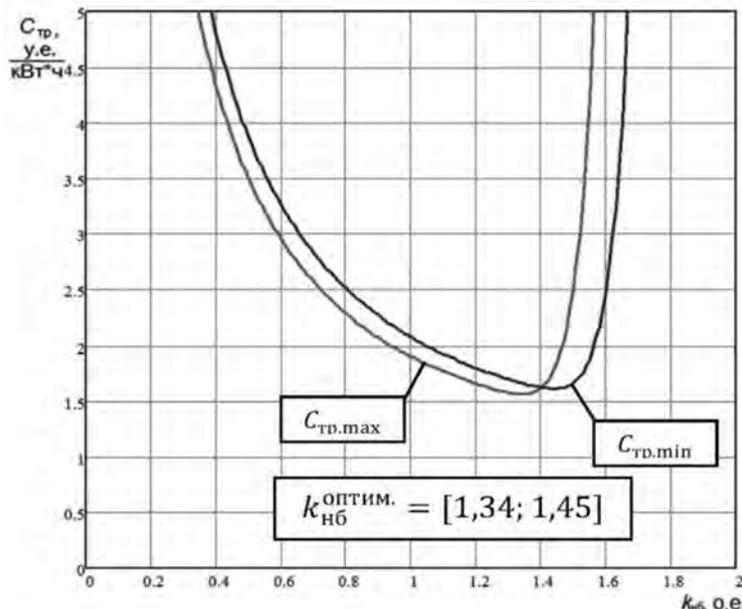


Рис. 7. – Границы множества графиков стоимости трансформации электроэнергии, обусловленного неопределенностью исходных данных.

Заключение

Предлагаемый метод выбора номинальной мощности силовых трансформаторов учитывает:

- критерий минимизации стоимости трансформации электроэнергии;
- требования действующих нормативно-технических документов и стандартов;
- изменение срока службы трансформатора при изменении интенсивности эксплуатации;
- неопределенность исходных данных.

Учет неопределенности исходных данных приводит к получению интервала значений экономически эффективной загрузки трансформатора.

Анализ используемой математической модели позволяет сделать заключение, что минимальные значения множества кривых, характеризующих неопределенность экономического эффекта, находятся в интервале между минимальными значениями граничных кривых множества.

Искомое значение номинальной мощности трансформатора должно удовлетворять полученному интервалу значений наиболее экономически эффективной загрузки трансформатора.

Описанный метод является усовершенствованием используемых в настоящее время методов и предлагается в качестве альтернативы.

Литература

1. Ершевич, В.В. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

2. Поспелов, Г.Е. Электрические системы и сети: учеб. / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 720 с.

3. Фурсанов М. И. Выбор номинальной мощности силовых трансформаторов / М. И. Фурсанов, И. И. Дуль // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 2. – С. 11 - 20.
4. Дуль И. И. Совершенствование методов выбора номинальной мощности силовых трансформаторов по критерию экономической эффективности/ И. И. Дуль, М. И. Фурсанов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Сборник научных статей. – 2015. – Выпуск 66 – С. 94 - 100.
5. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. ГОСТ 11677-85.
6. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. ГОСТ Р 52719-2007.
7. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. ГОСТ 14209-85.
8. Выбор мощности масляных трансформаторов по их допустимой аварийной перегрузке, Технический циркуляр ГПИ «Электропроект» №656 от 27.01.1986 г., подготовлен совместно с ВНИПИ «Тяжпром-электропроект» ТЦ №351-86, Москва.
9. Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий. СН 174-75.
10. Нормативы выбора мощности силовых трансформаторов. 8080тм-т1, М.: Энергосетьпроект, 1989.
11. Методические указания по выбору мощности силовых трансформаторов 10/0,4 кВ на подстанциях с/х назначения с учетом климатических условий РБ. Минск: Белэнергосетьпроект, 1994 г.
12. Трансформаторы силовые. Часть 7: Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. МЭК 60076-7:2005. (англ.).
13. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. СТП 34.20.501. М.: Энергоатомиздат, 1989.
14. Федин В.Т. Основы проектирования энергосистем: учебное пособие для студентов энергетических специальностей: в 2 ч. / В.Т. Федин, М.И. Фурсанов – Минск: БНТУ, 2010. – Ч. 1. – 322 с.
15. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.