

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133>

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕГО ЛИНЕЙНОГО РЕАКТОРА

Научная статья

Воркунов О.В.<sup>1,\*</sup>, Глоткина Л.А.<sup>2</sup>, Шакурова З.М.<sup>3</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-5381-0128;<sup>3</sup> ORCID : 0009-0009-4575-714X;<sup>1,2,3</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (vorcunov\_oleg[at]mail.ru)

**Аннотация**

В данной работе рассмотрен метод ограничения токов короткого замыкания с помощью подключения токоограничивающего линейного реактора к двухобмоточному силовому трансформатору со стороны высокого напряжения. Проведен эксперимент, позволивший количественно оценить амплитудные значения уменьшения возникающих токов короткого замыкания при применении токоограничивающего линейного реактора определенной индуктивности. Основываясь на экспериментальных данных, в программном комплексе MATLAB Simulink создана имитационная модель, позволяющая проводить количественную оценку снижения величины возникающих токов короткого замыкания двухобмоточных силовых трансформаторов различной мощности в электрических сетях напряжением 10 кВ, при использовании токоограничивающего линейного реактора выбранного номинала. Созданная имитационная модель позволяет подобрать требуемую величину индуктивности линейного реактора для снижения тока короткого замыкания и обеспечения необходимой чувствительности устройств релейной защиты. Построена зависимость возникающих значений токов короткого замыкания для силовых трансформаторов различной мощности напряжением 10/0.4 кВ с различными соединениями обмоток, а также величины их снижения при применении токоограничивающих линейных реакторов различной индуктивности.

**Ключевые слова:** ограничение токов короткого замыкания, токоограничивающий линейный реактор, индуктивность, силовой двухобмоточный трансформатор.

## A SIMULATION MODELING OF A CURRENT-LIMITING LINEAR REACTOR

Research article

Vorkunov O.V.<sup>1,\*</sup>, Glotkina L.A.<sup>2</sup>, Shakurova Z.M.<sup>3</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-5381-0128;<sup>3</sup> ORCID : 0009-0009-4575-714X;<sup>1,2,3</sup> Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

\* Corresponding author (vorcunov\_oleg[at]mail.ru)

**Abstract**

In this paper, we consider a method for limiting short-circuit currents by connecting a current-limiting linear reactor to a double-winding power transformer from the high voltage side. An experiment was carried out that made it possible to quantify the amplitude values of the reduction of the resulting short-circuit currents when using a current-limiting linear reactor of a certain inductance. Based on experimental data, a simulation model has been created in the MATLAB Simulink software package that allows for a quantitative assessment of the reduction in the magnitude of the resulting short-circuit currents of double-winding power transformers of various capacities in electric networks with a voltage of 10 kV, using a current-limiting linear reactor of the selected nominal value. The created simulation model allows you to select the required inductance of a linear reactor to reduce the short-circuit current and ensure the necessary sensitivity of relay protection devices. The dependence of the resulting values of short-circuit currents for power transformers of various capacities with a voltage of 10/0.4 kV with various connections of windings, as well as the magnitude of their decrease when using current-limiting linear reactors of various inductance, is constructed.

**Keywords:** limitation of short-circuit currents, current-limiting linear reactor, inductance, two-winding power transformer.

**Введение**

Возникновение тока короткого замыкания (КЗ) является одной из наиболее опасных ситуаций в электрических сетях, что может вызвать разрушительные последствия для электрооборудования. В частности, это приводит к увеличению потерь электроэнергии в проводниках и контактах, вызывает их повышенный нагрев, ускоряет старение и разрушение изоляции, потери механической прочности шин и проводов. Существуют разные способы снижения токов КЗ, к которым относят: секционирование электрических сетей, использование трансформатора с расщепленной обмоткой низкого напряжения, установка токоограничивающих реакторов.

Секционирование электрических сетей позволяет уменьшить уровни токов КЗ в реальных электрических сетях в 1,5–2 раза. В месте секционирования образуется так называемая точка деления сети. В мощной энергосистеме с большими токами КЗ таких точек может быть несколько. Недостатком секционирования является увеличение потерь электроэнергии в линиях электропередачи и трансформаторах в нормальном режиме работы, так как распределение потоков мощности при этом может быть неоптимальным. При мощности понижающего трансформатора 25 МВА и выше применяют расщепление обмотки низшего напряжения, что позволяет увеличить сопротивление такого

трансформатора в режиме КЗ примерно в 2 раза по сравнению с трансформатором без расщепления обмотки. Подробнее про экспериментальные исследования снижения токов КЗ с помощью расщепления обмотки низкого напряжения силового трансформатора можно ознакомиться здесь.

Токоограничивающие реакторы относятся к специальным техническим средствам ограничения токов КЗ. Основная область их применения – электрические сети напряжением 6-10 кВ. Иногда токоограничивающие реакторы используются в установках 35 кВ и выше, а также при напряжении ниже 1000 В. Конструктивно он представляет собой индуктивную катушку, не имеющую сердечника из магнитного материала (как правило, выполняется из сплавов алюминия, реже меди). Благодаря этому обладает постоянным индуктивным сопротивлением. В данной работе было решено ограничиться исследованием работы токоограничивающего линейного реактора (ТЛР), устанавливаемого на подстанциях после выключателя, непосредственно перед силовым трансформатором. Применение ЛР позволяет установить на подстанциях выключатели, рассчитанные на меньшие значения таких параметров как: периодическая составляющая тока КЗ, ударный ток КЗ, уменьшить площадь сечения присоединенных кабелей и соответственно удешевить общую схему распределительного устройства, без уменьшения требований к надежности работы электрооборудования. Несмотря на рассмотренные достоинства, ТЛР обладают рядом недостатков. В частности, из-за уменьшения токов КЗ возникают проблемы с обеспечением чувствительности резервных защит при отказе основных защит, либо выключателей присоединений релейной защиты подстанции. В связи с этим необходимо не только правильно рассчитывать величину индуктивности токоограничивающего реактора, но и значения токов КЗ, для взаимодействия с устройствами релейной защиты подстанций, обеспечивающих требуемые технические показатели.

Таким образом, выбор и расчет ТЛР является сложной задачей, решить которую без использования средств математического расчета и имитационного моделирования затруднительно.

### Материалы и методы

В публикациях разных авторов расчет требуемой величины индуктивности предлагается реализовывать с помощью математических расчетов с учетом реальных характеристик, основывающихся на паспортных данных электрооборудования. Ввиду сложности методов и большого объема расчетных данных, некоторыми авторами предлагаются способы облегчения расчетов, путем применения упрощенных формульных выражений [6], [7], [8]. Как правило, они базируются на данных математического моделирования полученных с помощью специализированных программных комплексов.

Авторами данной работы для определения числовых значений токов ТЛР, удовлетворяющих требованиями чувствительности устройств релейной защиты, а также оценке снижения токов КЗ, предложен подход, основывающийся в первую очередь на данные, полученные экспериментальным путем.

Созданная экспериментальная модель (рис. 1), включает в себя следующие функциональные узлы:

1. Генератор с регулировкой частоты, используемый в качестве трехфазного источника питания переменного тока (выдаваемое напряжение  $U$  может изменяться до значения 0.4 кВ, частота переменного тока  $f$  может изменяться от 0 до 100 Гц). Использование генератора с регулировкой частоты представляет интерес для экспериментального определения влияния частоты переменного тока на значение индуктивности ТЛР;

2. Силовой понижающий двухобмоточный трансформатор, используемый для подключения нагрузки (соединение обмоток треугольник-звезда с заземлением, мощность  $S = 80$  ВА);

3. Блок имитирующий работу токоограничивающего линейного реактора (переменная индуктивность);

4. Измерительные приборы для измерения напряжения и частоты генерируемого переменного тока;

5, 6. Точки измерения токов КЗ. Измерение возникающих токов КЗ, осуществлялось с помощью устройства согласования сигналов, подключенного через блок измерительных трансформаторов тока и напряжения. Устройство согласования сигналов принимает поступающие аналоговые сигналы, передает их для последующей оцифровки в персональный компьютер через плату сопряжения LabVIEW (DAQ-устройство). С помощью написанной программы на языке программирования G происходит обработка данных и выводит их на экран в графическом и цифровом представлении. В целях сокращения объема статьи программа написанная в среде LabVIEW (блок диаграмма), а также описание ее блоков не приводится.

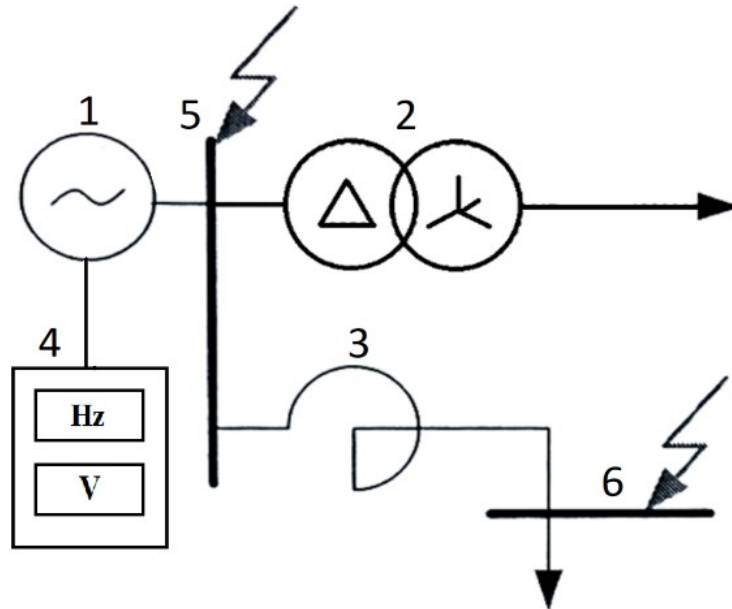


Рисунок 1 - Однолинейная электрическая схема созданной экспериментальной установки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133.1>

Примечание: 1 – генератор; 2 – силовой двухобмоточный трансформатор; 3 – токоограничивающий линейный реактор; 4 – измерительные приборы частоты и напряжения переменного тока; 5 и 6 – точки измерения КЗ

В проведенном эксперименте были сравнены значения токов КЗ возникающих в силовом двухобмоточном трансформаторе на стороне высокого напряжения (рис. 1, (5)) без установленного ТЛР и после его установки (рис. 1, (6)). Блок переменной индуктивности (рис. 1, (3)) включается в цепь электропитания последовательно, что создает на стороне высокого напряжения двухобмоточного силового трансформатора дополнительное индуктивное сопротивление. Это ограничивает значение тока КЗ, поскольку индуктивность препятствует его быстрому изменению [9].

Компьютерная модель созданная в программе MatLAB Simulink, включающая в себе блоки аналогичные экспериментальному стенду представлена на рис. 2.

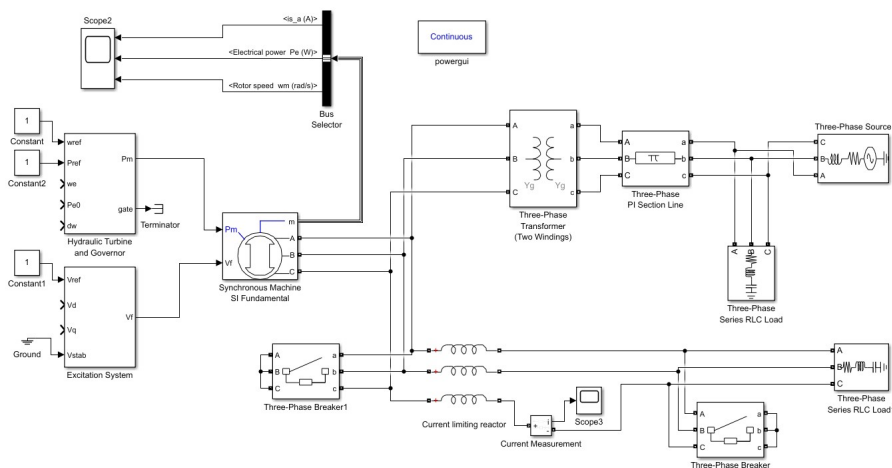


Рисунок 2 - Блок-схема имитационной модели ограничение тока КЗ с помощью линейного реактора в программе MatLAB Simulink

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133.2>

Схема имитирует электрическую схему созданной экспериментальной установки. На блок «Synchronous Machine SI Fundamental», который реализует смоделированную 3-фазную синхронную машину, подводится переменное напряжение через трехфазный генератор (блок «Three-Phase Source») посредством понижающего трансформатора напряжением  $U = 10/0,4$  кВ. Сопротивления обмоток силового трансформатора можно задать по паспортным данным, или вычислить по известным формулам [10].

Блок «Excitation System» представляет собой систему, реализующую возбудитель машины переменного тока. В качестве токоограничивающего линейного реактора используется катушка индуктивности. Для получения сигналов применяются измерительные трансформаторы и осциллографы. Блок «Bus Selector» принимает шину в качестве входных данных и выводит их на дисплей, что позволяет получить данные.

### Результаты и обсуждения

В результате проведенных экспериментальных исследований с помощью созданной модели (рис. 1), была проведена оценка снижения амплитудных значений возникающих токов короткого замыкания при применении токоограничивающего линейного реактора определенной индуктивности. Анализ влияния проводился с помощью программы написанной на языке программирования G в среде LabVIEW. Эксперимент проводился для трехфазного КЗ, как наиболее опасного случая в ЭС. Пример графической зависимости полученной с помощью данной программы представлен на рис. 3. Первичные параметры: напряжение  $U = 0.4$  кВ, частота переменного тока  $f = 50$  Гц, индуктивность (для ограничения токов КЗ)  $L = 0.9$  Гн.

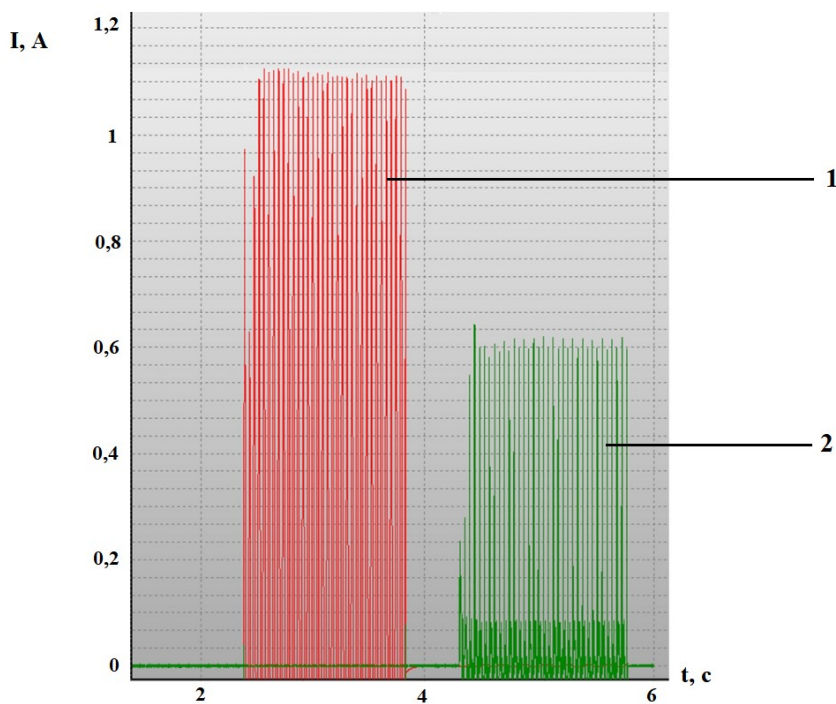


Рисунок 3 - Трехфазное КЗ на стороне ВН силового трансформатора без установки ТЛР (1) и с установленным ТЛР (2)  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133.3>

По оси абсцисс – представлена продолжительность тока КЗ ( $t$ , с), по оси ординат – значения токов КЗ ( $I$ , А). Из графика наглядно видно, что применение ТЛР ограничивает токи КЗ (амплитудное значение тока  $I = 0.63$  А) в 1.8 раз меньше, чем без него (амплитудное значение тока  $I = 1.16$  А). Далее, экспериментальным путем при частоте переменного тока  $f = 50$  Гц было определено исследование влияния значения индуктивности  $L$  на величину тока КЗ (рис. 4). По оси абсцисс – представлено значение ( $L$ , Гн), по оси ординат – значения токов КЗ ( $I$ , А). Эксперимент для большей точности проводился несколькими сериями, с одними и теми же значениями. На рис. 4 приведены средние значения каждой серии измерений.

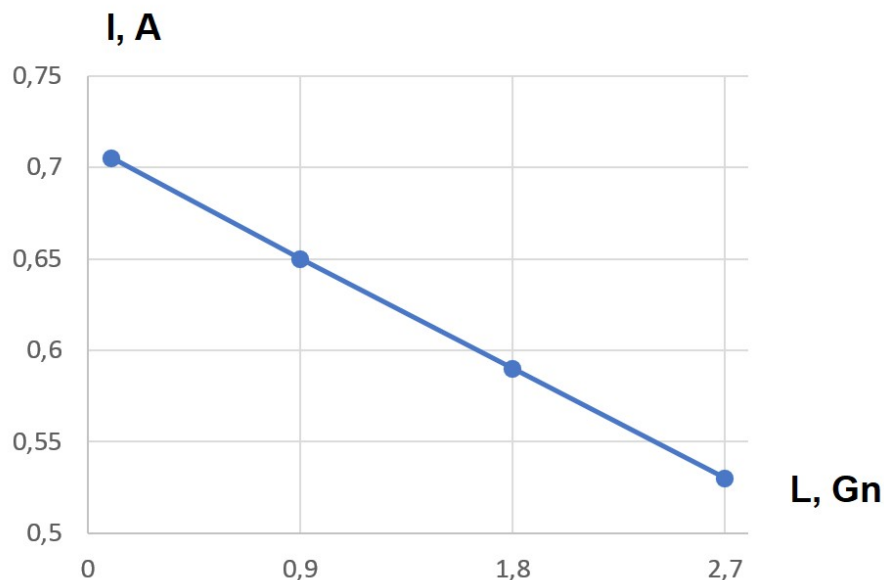


Рисунок 4 - Влияние индуктивности на значение тока КЗ  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133.4>

В процессе эксперимента индуктивность ТЛР изменялась согласно следующим значениям:  $L = 0.1$  Гн, (соответствует значению тока КЗ:  $I = 0.71$  А);  $L = 0.9$  Гн ( $I = 0.65$  А);  $L = 1.8$  Гн ( $I = 0.59$  А);  $L = 2.7$  Гн ( $I = 0.536$  А) (значения токов КЗ округлены). Как видно из fig. 4 снижение токов КЗ в зависимости от величины индуктивности при частоте переменного тока  $f = 50$  Гц имеет линейный характер. Зная эту закономерность, мы можем определить величину снижения величины тока КЗ при применении ТЛР. Эти данные полностью совпадают с теоретическими, поскольку индуктивность в данном случае работает как сопротивление [10].

Производители электрооборудования в характеристиках ТЛР, как правило, не указывают значение индуктивности, вместо нее оперируют значением индуктивного сопротивления. Величина индуктивного сопротивления определяется величиной ЭДС самоиндукции, которая, в свою очередь, зависит от индуктивности катушки ТЛР и частоты изменения переменного тока [10]. Индуктивное сопротивление  $X_L$  ТЛР можно вычислить следующим образом.

$$X_L = \omega L \quad (1)$$

где  $L$  – это индуктивность катушки (Гн),  $\omega$  – угловая частота переменного тока (рад/сек).  
Поскольку угловая частота переменного тока:

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

где  $f$  – частота переменного тока (Гц), то индуктивное сопротивление  $X_L$  ТЛР из выражения (1) вычисляется следующим образом:

$$X_L = 2\pi f L \quad (3)$$

Созданная имитационная модель в программном комплексе MatLAB Simulink позволяет не только рассчитывать токи КЗ, но и подбирать значение ТЛР, обеспечивающего требуемые настройки устройств релейной защиты. Сама методика расчета и проектирования ТЛР описана здесь [11], и в целях сокращения объема авторами не приводится.

В качестве примера работоспособности для разных моделей силовых трансформаторов работающих на напряжение  $U = 10$  кВ были проведены расчеты значений возникающих токов КЗ, а также величина их снижения с помощью применения ТЛР. Программа учитывает следующие параметры силовых трансформаторов: мощность (кВА), напряжение КЗ силового трансформатора (паспортные данные), активные и реактивные сопротивления обмоток (Ом), тип соединения обмоток (треугольник-звезда; звезда-звезда). На рис. 5 представлен график зависимости мощности силового трансформатора ( $S = 250, 400, 630, 1000$  кВА) от величины токов трехфазного КЗ без применения ТЛР (граф 1) и с применением последнего (граф 2, 3, 4, 5) (соединение обмоток двухобмоточного трансформатора «треугольник-звезда»). Для приведенных графиков величины индуктивности  $L$  соответствуют следующим значениям индуктивных сопротивлений  $X_L$ :

- граф № 2.  $L = 0.1$  Гн ( $X_L = 31,4$  Ом);
- граф № 3.  $L = 0.9$  Гн ( $X_L = 282,6$  Ом);
- граф № 4.  $L = 1.8$  Гн ( $X_L = 565,2$  Ом);
- граф № 5.  $L = 2.7$  Гн ( $X_L = 847,8$  Ом).

Как видно из графиков, чем меньше индуктивность ТЛР (индуктивное сопротивление), тем на меньшую величину происходит уменьшение токов КЗ. Наиболее заметно уменьшение токов КЗ при применении трансформаторов более высокой мощности. При изменении соединения обмоток двухобмоточных трансформаторов с соединения «треугольник-звезда» на «звезда-звезда» токи КЗ меняются незначительно. На рис. 6 представлен график зависимости мощности силового трансформатора ( $S = 250, 400, 630, 1000$  кВА) от величины токов трехфазного КЗ без применения

ТЛР (граф 1) и с применением последнего (граф 2, 3, 4, 5) (соединение обмоток двухобмоточного трансформатора «звезда-звезда»).

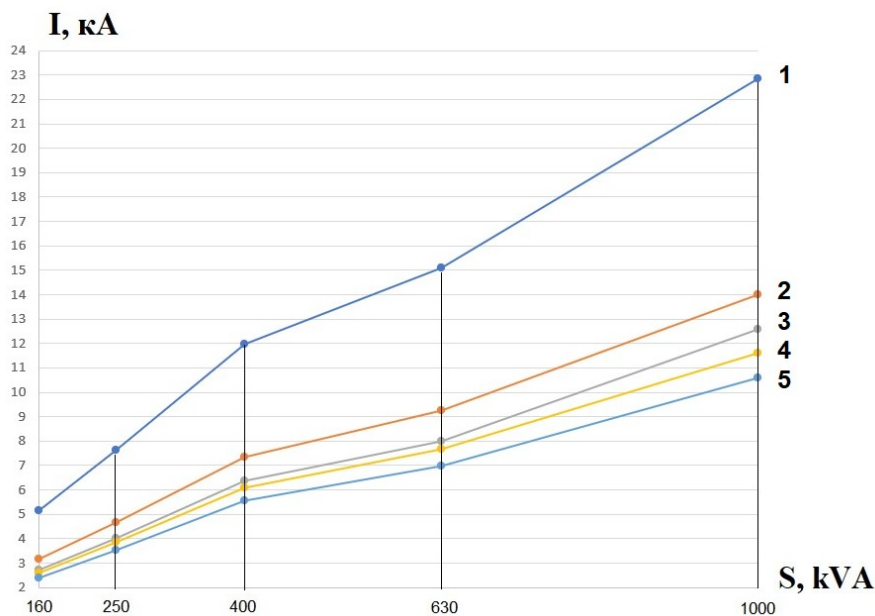


Рисунок 5 - Зависимость влияния токов трехфазного КЗ для силовых трансформаторов различной мощности.

Соединение обмоток «треугольник-звезда»  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133.5>

Примечание: 1 – без применения ТЛР; 2, 3, 4, 5 – с применением ТЛР различной индуктивности (2 –  $L = 0.1$  Гн; 3 –  $L = 0.9$  Гн; 4 –  $L = 1.8$  Гн; 5 –  $L = 2.7$  Гн)

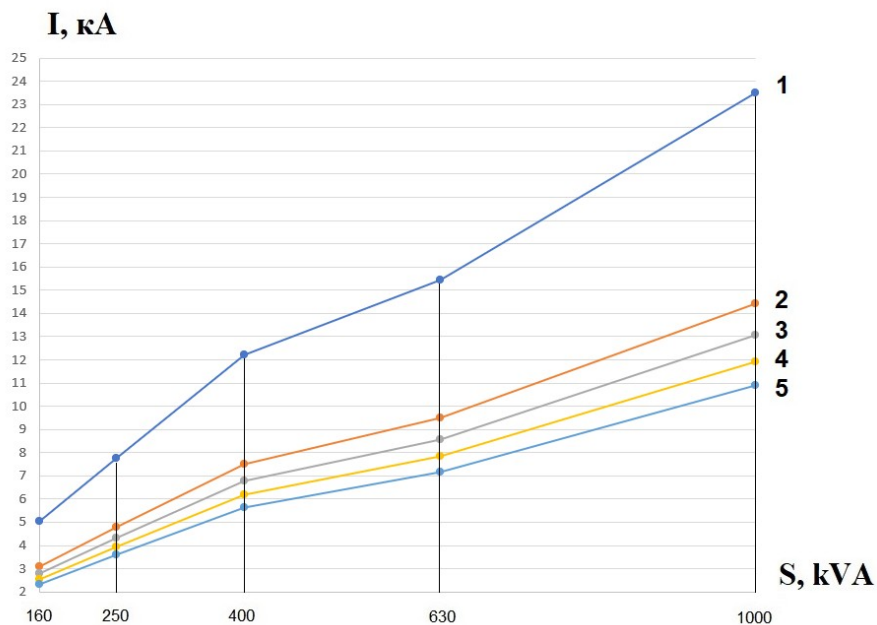


Рисунок 6 - Зависимость влияния токов трехфазного КЗ для силовых трансформаторов различной мощности.

Соединение обмоток «звезда-звезда»  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.133.6>

Примечание: 1 – без применения ТЛР; 2, 3, 4, 5 – с применением ТЛР различной индуктивности (2 –  $L = 0.1$  Гн; 3 –  $L = 0.9$  Гн; 4 –  $L = 1.8$  Гн; 5 –  $L = 2.7$  Гн)

Таким образом, приведенные зависимости на рис. 5 и рис. 6, позволяют ориентироваться на параметры ТЛР для трансформатора определенной мощности, для снижения тока короткого замыкания и обеспечения необходимой чувствительности устройств релейной защиты. Токи КЗ возникающие при соединении обмоток силовых трансформаторов «звезда-звезда» несколько больше, чем при «треугольник-звезда».

Созданный программный модуль позволяет рассчитывать также токи КЗ, возникающие при двухфазном и однофазном КЗ.

### Заключение

Применение экспериментальных моделей или проведение реальных экспериментов на работающем электрооборудовании – это достаточно сложный и трудоемкий процесс, однако он позволяет получить наиболее точный результат, максимально приближенный к реальным процессам. Имитационные модели реальных физических процессов, основывающиеся на экспериментальных исследованиях более точны. В целом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. С помощью ТЛР можно эффективно ограничивать токи короткого замыкания КЗ в силовых трансформаторах различной мощности.

2. Величина ограничения токов КЗ линейно снижается в зависимости от индуктивности ТЛР (индуктивного сопротивления).

3. На значения возникающих токов КЗ влияют физические характеристики силовых трансформаторов. Для трансформаторов, рассчитанных на более высокую мощность, данный параметр выше.

4. С помощью имитационной модели построенной в программном комплексе MatLAB Simulink получены зависимости возникающих значений токов короткого замыкания для силовых трансформаторов различной мощности напряжением 10/0.4 кВ, с различными соединениями обмоток, а также величины их снижения при применении ТЛР различной индуктивности (индуктивного сопротивления).

На основании анализа полученных экспериментальным путем осциллограмм был сделан вывод об изменении скорости тока при применении токоограничивающего реактора. В частности, при большем индуктивном сопротивлении ТЛР скорость нарастания тока снижается.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Лapidус А.А. Анализ термического действия токов короткого замыкания в кабельных линиях напряжением 0,4 кВ в зависимости от места повреждения / А.А. Лapidус, С.Н. Соловьева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. — 2011. — 1. — с. 46-49.
2. Манилов А.М. Ограничение токов короткого замыкания в сетях высокого напряжения с помощью высокочастотных заградителей / А.М. Манилов // Энергетик. — 2012. — 9. — с. 60-67.
3. Roos M.H. Sectionalizing Distribution Networks Concept and System Framework / M.H. Roos, P.H. Nguyen, J. Morren et al. // International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). — 2018. — 62-71.
4. Воркунов О.В. Анализ токов короткого замыкания силового трансформатора с помощью программных и аппаратных средств / О.В. Воркунов, Л.А. Глоткина // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — 11. — с. 347-349.
5. Доронин А.В. Оценка дальнего резервирования в сетях генераторного напряжения / А.В. Доронин, Л.О. Нехаева, Е.В. Пашковская // Релейная защита. — 2015. — 1. — с. 40-42.
6. Колобанов П.А. Совершенствование аналитических методов исследования внутренних замыканий в двухобмоточных трансформаторах для целей релейной защиты / П.А. Колобанов, А.Л. Куликов // Электроэнергетика. — 2019. — 1. — с. 19-23.
7. Jin H. Fast Short-circuit Current Calculation of Unbalanced Distribution Networks with Inverter-interfaced Distributed Generators / H. Jin, L. Zhixuan, L. Weixi et al. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. — 2015. — 146. — p. 271-280.
8. Insu K. A Calculation Method for the Short-circuit Current Contribution of Current-control Inverter-based Distributed Generation Sources at Balanced Conditions / K. Insu // Electric Power Systems Research. — 2017. — 190. — p. 106-118.
9. Кобилецкий А.А. Сухие токоограничивающие реакторы / А.А. Кобилецкий, А.Л. Тарчуткин // Главный энергетик. — 2010. — 3. — с. 26-28.
10. Соловьев А.Л. Расчет токов короткого замыкания и замыканий на землю в распределительных сетях / А.Л. Соловьев, И.В. Иванов, Е.А. Сельков // Методические указания, Стандартоорганизация ООО "НТЦ "Механотроника", Санкт-Петербург. — 2017. — 1. — с. 35.
11. Правила устройства электроустановок — Введ. 2003-01-01. — Москва: Эксмо, 2003.— 752 с.

12. Кириллов И.В. Расчёт токоограничивающего реактора / И.В. Кириллов, И.С. Рахманов, С.В. Попиль и др. // Научное наследие. — 2021. — 75. — с. 29-39.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Lapidus A.A. Analiz termicheskogo dejstvija tokov korotkogo zamykanija v kabel'nyh liniyah naprjazheniem 0,4 kV v zavisimosti ot mesta povrezhdenija [Analysis of the Thermal Effect of Short-circuit Currents in 0.4 kV Cable Lines, Depending on the Location of Damage] / A.A. Lapidus, S.N. Solov'eva // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University. Science and Education. — 2011. — 1. — p. 46-49. [in Russian]
2. Manilov A.M. Ogranichenie tokov korotkogo zamykanija v setjah vysokogo naprjazhenija s pomosh'ju vysokochastotnyh zagraditelej [Limitation of Short-circuit Currents in High-voltage Networks Using High-frequency Barriers] / A.M. Manilov // The Power Engineer. — 2012. — 9. — p. 60-67. [in Russian]
3. Roos M.H. Sectionalizing Distribution Networks Concept and System Framework / M.H. Roos, P.H. Nguyen, J. Morren et al. // International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). — 2018. — 62-71.
4. Vorkunov O.V. Analiz tokov korotkogo zamykanija silovogo transformatora s pomosh'ju programmnyh i apparatnyh sredstv [Analysis of Short-circuit Currents of a Power Transformer Using Software and Hardware] / O.V. Vorkunov, L.A. Glotkina // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. — 2023. — 11. — p. 347-349. [in Russian]
5. Doronin A.V. Otsenka dal'nego rezervirovanija v setjah generatornogo naprjazhenija [Evaluation of Long-range Redundancy in Generator Voltage Networks] / A.V. Doronin, L.O. Nehaeva, E.V. Pashkovskaja // Relay Protection. — 2015. — 1. — p. 40-42. [in Russian]
6. Kolobanov P.A. Sovershenstvovanie analiticheskikh metodov issledovanija vnutrennih zamykanij v dvuhobmotochnyh transformatorah dlja tselej relejnoj zaschity [Improvement of Analytical Methods for the Study of Internal Circuits in Double-winding Transformers for Relay Protection Purposes] / P.A. Kolobanov, A.L. Kulikov // Electric Power Industry. — 2019. — 1. — p. 19-23. [in Russian]
7. Jin H. Fast Short-circuit Current Calculation of Unbalanced Distribution Networks with Inverter-interfaced Distributed Generators / H. Jin, L. Zhixuan, L. Weixi et al. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. — 2015. — 146. — p. 271-280.
8. Insu K. A Calculation Method for the Short-circuit Current Contribution of Current-control Inverter-based Distributed Generation Sources at Balanced Conditions / K. Insu // Electric Power Systems Research. — 2017. — 190. — p. 106-118.
9. Kobiletskij A.A. Suhie tokoogranichivajuschie reaktory [Dry Current Limiting Reactors] / A.A. Kobiletskij, A.L. Tarchutkin // Chief Power Engineer. — 2010. — 3. — p. 26-28. [in Russian]
10. Solov'ev A.L. Raschet tokov korotkogo zamykanija i zamykanij na zemlju v raspreditel'nyh setjah [Calculation of Short-circuit and Earth Fault Currents in Distribution Networks] / A.L. Solov'ev, I.V. Ivanov, E.A. Sel'kov // Methodological guidelines, the Standard organization of LLC "STC "Mechanotronica", St. Petersburg. — 2017. — 1. — p. 35. [in Russian]
11. Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations] — Introduced 2003-01-01. — Moskva: Eksmo, 2003.— 752 p. [in Russian]
12. Kirillov I.V. Raschet tokoogranichivajushego reaktora [Calculation of the Current Limiting Reactor] / I.V. Kirillov, I.S. Rahmanov, S.V. Popil' et al. // The Scientific Heritage. — 2021. — 75. — p. 29-39. [in Russian]