

DOI 10.23859/1994-0637-2020-4-97-8
УДК 004.942

© Ясинский И. Ф., Егоров Д. В., 2020

Ясинский Игорь Федорович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
энергетический университет
имени В. И. Ленина
(Иваново, Россия)
E-mail: igor.yasinskiy@gmail.com

Iasinskii Igor' Fedorovich

PhD in Technology, Associate Professor,
Ivanovo State Power University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: igor.yasinskiy@gmail.com

Егоров Денис Владимирович

Магистрант,
Ивановский государственный
энергетический университет
имени В. И. Ленина
(Иваново, Россия)
E-mail: egorovedv@mail.ru

Egorov Denis Vladimirovich

Student in the master's programme,
Ivanovo State Power University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: egorovedv@mail.ru

**АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ
ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО
ВВОДА ТРАНСФОРМАТОРОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**DESIGN AUTOMATION OF INTERNAL
ISOLATION OF HIGH VOLTAGE
TRANSFORMERS INPUT USING
PARALLEL COMPUTING**

Аннотация. Процесс проектирования трансформатора сопровождается противоречивыми требованиями к его качествам. Это обстоятельство связано с тем, что трансформатор включает большое количество элементов и изготавливается на индивидуально настраиваемом оборудовании. Вместе с тем производство трансформаторов связано с использованием таких ценных материалов, как медь, алюминий, сталь и др. Следовательно, трансформатор является сложной системой, качественное проектирование которой затруднительно без автоматизации. Предлагается ускорить процесс расчета внутренней изоляции трансформатора с помощью параллельной вычислительной среды и применения быстрых алгоритмов.

В работе использованы методы математического моделирования физических объектов, методы прикладной математики, принципы компьютерного моделирования физических объектов, алгоритмы распараллеливания вычислительного процесса в интерфейсах с общей памятью, анализ результатов вычислительных экспериментов.

Abstract. The design process of a transformer is characterized by conflicting requirements for its qualities. This circumstance is due to the fact that the transformer includes a large number of elements and is manufactured on individually tuned equipment. Moreover, the production of transformers is associated with the cost of such valuable materials as copper, aluminum, steel, etc. Thus, the transformer is a complex system, the high-quality design of which is difficult without automation. It is proposed to speed up the process of calculating the internal isolation of a transformer using a parallel computing environment and the use of fast algorithms.

Methods of mathematical modeling of physical objects, methods of applied mathematics, principles of computer modeling of physical objects, algorithms for parallelizing the computing process in interfaces with shared memory, analysis of the results of computational experiments are applied.

A software system has been developed for the automated design of the internal isolation of the high-voltage input of the transformer. It is

Создана программная система для автоматизированного проектирования внутренней изоляции высоковольтного ввода трансформатора. Показано, что алгоритм расчета характеристик изоляции работает корректно, напряженности на слоях не превышают максимально допустимых значений. Полученные результаты расчета сведены в таблицы и представлены графически. Параллельный интерфейс OpenMP дает увеличение скорости расчета в 2,6 раза по сравнению с последовательной версией.

Разработанная система может служить инструментом повышения производительности процесса проектирования трансформатора. В системе достигнут заданный уровень достоверности и точности расчета. Автоматизация процесса способствует снижению влияния человеческого фактора на возможность совершения ошибки по сравнению с традиционной неавтоматизированной методикой расчета.

Ключевые слова: программные системы, автоматизированное проектирование, параллельные вычисления, изоляция трансформатора

shown that the algorithm for calculating the isolation characteristics works properly; the stresses on the layers do not exceed the maximum allowable values. The obtained calculation results are summarized in tables and presented graphically. The parallel OpenMP interface provides an increase in calculation speed of 2.6 times compared with the serial version

The developed system can be a tool to increase the productivity of the transformer design process. The system has reached the specified level of reliability and accuracy of the calculation. Automation of the process helps to reduce the influence of the human factor in the possibility of a mistake in comparison with a traditional non-automated calculation method.

Keywords: software systems, computer-aided design, parallel computing, transformer isolation

Введение

Трансформатор представляет собой электромагнитное устройство, служащее для преобразования переменного тока одного напряжения в другое с сохранением частоты¹. Номенклатура трансформаторов превышает несколько сотен типов. Учитывая при этом высокий уровень обновляемости данного вида оборудования, составляющий в среднем от 8 до 10 лет, становится очевидна строгость требований, предъявляемых ко всем этапам производства силовых трансформаторов. Заметим, что проектированию отводится главная роль, поскольку именно этот этап определяет основные характеристики изделия².

Для высоковольтного оборудования крайне важна безотказная работа во всех возможных режимах. Чтобы обеспечить его надежность, необходимо оптимально спроектировать изоляцию, учитывая при этом технико-экономические показатели

¹ Попов Г. В., Игнатьев Е. Б. Об определении индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 4. – С. 54–57.

² Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. – Москва: ЛЕЛАНД, 2014. – 528 с.

(размеры оборудования, состав изоляционных материалов, возможность транспортировки, а также себестоимость производства)¹.

В настоящий момент проектирование оборудования производится разработчиками преимущественно в специальных программных комплексах, таких как Mathcad, MathLab и др.² Указанную организацию вычислений отличают следующие недостатки:

- влияние человеческого фактора, по причине которого возможны ошибки в расчетах;
- значительные временные затраты в контексте традиционного проектирования высоковольтного оборудования.

Таким образом, становится очевидной необходимость внедрения специализированных автоматизированных средств разработки, проектирования и моделирования режимов работы высоковольтного оборудования³.

Программа автоматизированного проектирования должна соответствовать следующим условиям:

- удобный для пользователя интерфейс (понятный ввод входных данных, наглядное представление результатов вычислений, надежность функционирования программы);
- обеспечение высокой точности;
- минимальное время расчета.

Целью проекта является создание и совершенствование автоматизированной программной системы расчета параметров внутренней изоляции высоковольтного ввода трансформаторов.

Основная часть

Описание процесса расчета параметров внутренней изоляции высоковольтного ввода трансформаторов

Надежное функционирование высоковольтного оборудования обусловлено подбором подходящих параметров изоляции. К ним относятся: размеры узлов изолятора, диаметр токоведущего стержня, число слоев изоляционного остова, длины кон-

¹ Тихонов А. И., Стулов А. В., Еремин И. В., Плаксин А. В. Разработка конструкции и методики проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфных сплавов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 6. – С. 57–65.

² Стулов А. В., Трофимович И. А., Тихонов А. И. Разработка САПР силовых трансформаторов на основе автономных библиотек моделирования физических полей и электрических цепей // Пром-Инжиниринг: труды III Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург – Челябинск – Новочеркасск – Владивосток, 16–19 мая 2017 г.). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 78–84.

³ Буткевич В. Ф., Уразалиев И. Б., Фирсов Д. М. Система онлайн-диагностирования и мониторинга конденсаторов связи 110 КВ и трансформаторных вводов с RIP-изоляцией под рабочим напряжением // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № S4 (11). – С. 22–33.

денсаторных обкладок, толщина и емкость слоев изоляции, напряженности в слоях изоляции и их распределение по радиальной составляющей¹.

При проектировании принципиально важна минимизация ошибок при расчете параметров высоковольтного оборудования. Это может достигаться в том числе за счет высокой точности округления и представления полученных значений.

Данная операция позволяет повысить качество проектирования изоляции, благодаря чему улучшаются эксплуатационные характеристики всей системы электрооборудования. Контроль со стороны специалиста может осуществляться на основании проверки корректности расчета значений ключевых характеристик изоляции².

Как правило, проектирование различных составляющих высоковольтного оборудования распределяется между несколькими сотрудниками. Автоматизированный расчет дает возможность существенного повышения производительности (или сокращения трудовых затрат), так как в одном программном комплексе может решаться целый ряд поставленных перед инженером задач.

Электрический расчет внутренней изоляции включает в себя несколько этапов:

- 1) выбор расчетных напряжений;
- 2) выбор размеров остова и фарфоровых покрышек ввода;
- 3) выбор допустимых радиальных напряженностей;
- 4) определение длин стержня и фланцев;
- 5) определение радиуса стержня и радиуса фланца;
- 6) определение числа слоев изоляционного остова;
- 7) определение длин конденсаторных обкладок и расчет их радиусов;
- 8) определение толщины слоев изоляции;
- 9) вычисление максимальных и минимальных радиальных напряженностей в слоях изоляции.

Проходные изоляторы (см. рис. 1) служат для ввода высокого напряжения внутрь металлических баков силовых трансформаторов, шунтирующих и токоограничивающих реакторов, масляных выключателей, конденсаторов и других видов оборудования высокого напряжения для кабельного подключения трансформаторов, а также для изоляции шин при проходе их через стены распределительных устройств.

¹ Свиридов В. А., Бахарев Н. П. Обеспечение электродинамической стойкости силовых трансформаторов // Молодой ученый. – 2017. – № 32 (166). – С. 20–25. – URL: <https://moluch.ru/archive/166/45370/> (дата обращения: 21.04.2020).

² Блинова К. Ю., Аблицов О. И. Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов с помощью системы контроля изоляции трансформаторов (СКИТ) // Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: сборник статей по материалам XL Международной студенческой научно-практической конференции (Новосибирск, 29 марта 2016 г.). – Новосибирск: АНС СибАК, 2016. – № 3 (39). – URL: [https://sibac.info/archive/technic/3\(39\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/3(39).pdf) (дата обращения: 21.04.2020).

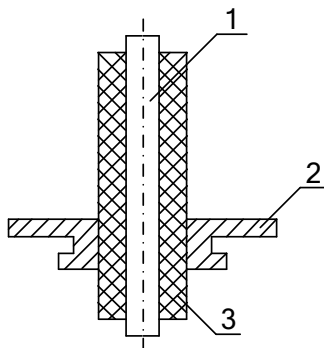


Рис. 1. Эскиз проходного изолятора:
1 – токоведущий стержень, 2 – фланец, 3 – изоляционный остов

Проходные изоляторы в высоковольтных аппаратах и трансформаторах, в отличие от других изоляторов, имеют весьма неблагоприятное расположение электродов, приводящее к крайне неравномерному распределению радиальной и аксиальной напряженности электрического поля. Наибольшая напряженность возникает у фланца, по которому она направлена в основном вдоль поверхности ввода. Как только напряженность превысит допустимую величину, возникают местные разряды сначала в виде короны, а затем в виде скользящих разрядов, приводящих к разрушению изоляции, возможным радиальным пробоям и продольным перекрытиям.

По этой причине при конструировании вводов высокого напряжения приходится применять искусственные меры для уменьшения аксиальной напряженности и обеспечения большей равномерности радиальной напряженности.

В результате расчета определяются максимальные и минимальные напряженности на каждом слое изоляции, которые сравниваются с допустимыми значениями. Если хотя бы на одном слое значение напряженности превышает допустимую величину, необходимо корректировать изначально рассчитанные данные и выполнять вычисления заново, что при традиционной неавтоматизированной форме расчета требует значительных временных затрат на проектирование.

При соблюдении указанных условий правильности вычислений инженер может приступить к конструктивной части проектирования, в которой разрабатывается чертеж с указанием всех габаритных размеров ввода, полученных на основе электрического расчета.

Алгоритмизация расчета внутренней изоляции трансформатора

Последовательный алгоритм функционирования

На рис. 2 представлена блок-схема последовательного расчета параметров высоковольтного ввода конденсаторного типа с бумажно-масляной многослойной изоляцией.

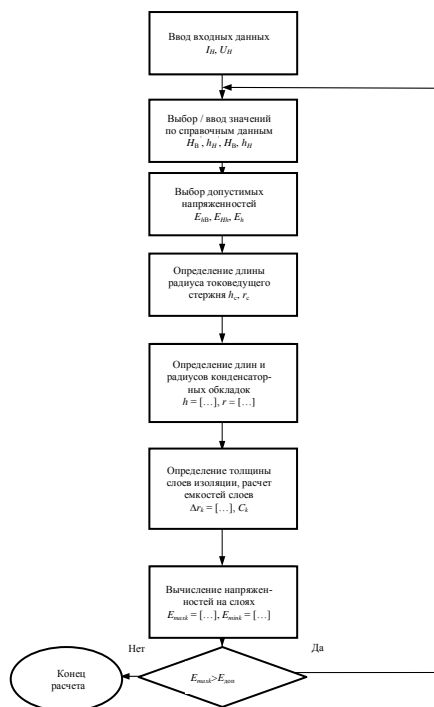


Рис. 2. Блок-схема последовательного алгоритма поиска оптимальных параметров высоковольтного ввода

Согласно блок-схеме производится ввод номинальных значений по техническому заданию. На следующем этапе вносятся значения по справочным данным, исходя из номинальных параметров ввода. Эти значения выбираются с опорой на номинальное напряжение, на которое рассчитывается оборудование. Напряжение может иметь значения 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ. Исходя из данных номинальных параметров, по справочным данным определяются значения H_v и h_n и вводятся в программу расчета с учетом k_3 – коэффициента запаса, который также вносится в программу оператором. Затем выполняется процесс расчета допустимых аксиальных напряженностей в верхней и нижней частях ввода и средней аксиальной напряженности. Эти значения используются в последующем поиске параметров ввода. Далее производится вычисление (определение) длины и радиуса токоведущей части изолятора (h_c , r_c). На основе всех полученных данных рассчитываются параметры самой изоляции, а именно:

- 1) количество слоев изоляции (m);
- 2) длины и радиусы конденсаторных обкладок – $h = [...]$ и $r = [...]$ в зависимости от числа слоев m ;
- 3) толщина слоя изоляции – $\Delta r_k = [...]$ для m слоев;
- 4) емкость для каждого слоя – $C_k = [...]$;
- 5) максимальная и минимальная напряженности для каждого слоя – E_{max_k} и E_{min_k} .

Далее производится контроль правильности расчета, если хотя бы для одного слоя $E_{max,k} > E_{доп}$, то программа возвращается обратно в блок ввода значений и просит скорректировать введенные данные. После коррекции введенных данных производится пересчет всех параметров заново. Если максимальные радиальные напряженности не превышают допустимых значений, то программа заканчивает расчет и выводит найденные параметры на экран. Если расчет оказывается успешным, программа останавливается и ждет указаний оператора.

По блок-схеме видно, что последовательный алгоритм может занять значительное время при переборе входных данных, удовлетворяющих корректности вычислений. Таким образом, для сокращения временного интервала поиска оптимальных параметров необходимо ускорение работы программы. Параллельная реализация делает возможным выполнение серий расчетов с выбором наиболее подходящих по точности полученных значений.

Параллельный алгоритм функционирования

В параллельной схеме реализован принцип производства нескольких вариантов расчета, которые реализуются одновременно, независимо друг от друга.

В конце вычислений полученные значения максимальной и минимальной напряженности проверяются на условие соответствия допустимой напряженности. Все прошедшие проверку варианты расчета сравниваются между собой по оптимальности. За оптимальный принимается вариант, при котором значения напряженности максимально отличаются от допустимой напряженности в слоях изоляции высоковольтного ввода. Если полученные данные какого-либо варианта расчета не прошли проверку по допустимым значениям напряженности, то эти результаты стираются.

После нахождения оптимального варианта вычислений рассчитанные значения выводятся на экран либо на печать. Среди результатов отображаются габаритные размеры ввода, длина и радиус токоведущего стержня, длины конденсаторных обкладок, толщина слоев. Кроме того, приводятся электрические параметры: емкости слоев изоляции, максимальные и минимальные напряженности на слоях.

Блок-схема параллельного алгоритма поиска оптимальных параметров высоковольтного ввода показана на рис. 3.

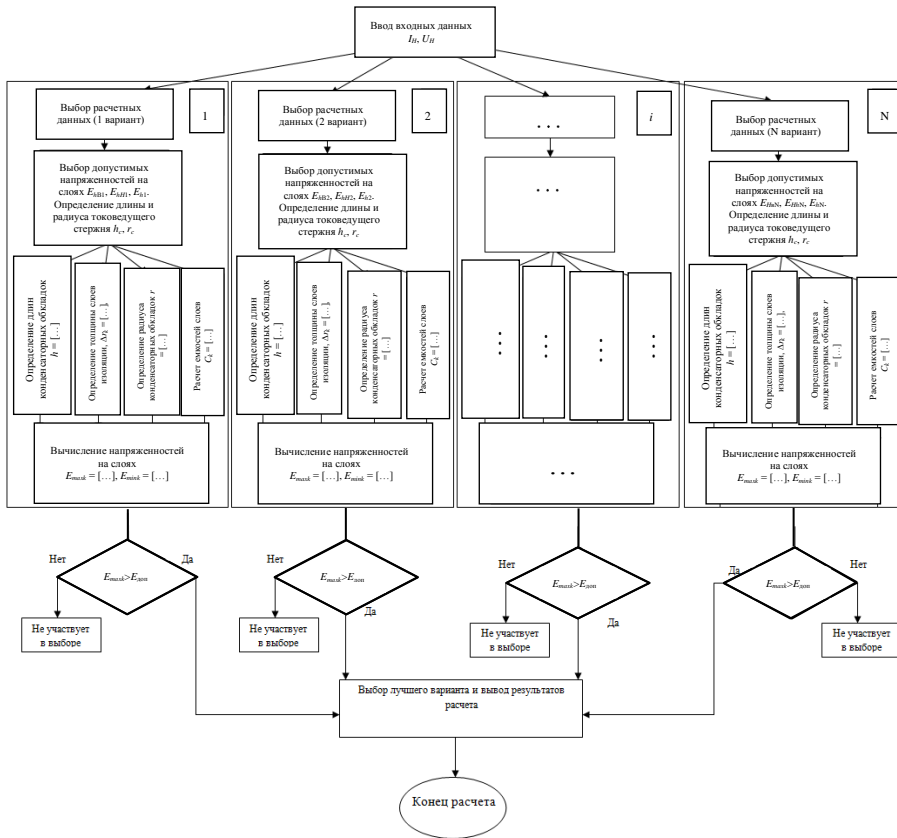


Рис. 3. Блок-схема параллельного алгоритма поиска оптимальных параметров высоковольтного ввода

В отличие от последовательного расчета, в параллельном расчете вводится несколько вариантов значений $H_{в1}', H_{в2}', \dots, H_{вN}'$ и $h_{н1}', h_{н2}', \dots, h_{нN}'$. Введенные варианты входных данных распределяются по потокам от 1 до N , в каждом из которых на основе указанных сведений определяются все необходимые параметры ввода. Рассчитываются допустимые напряженности и размеры токоведущей части – h_c и r_c .

Далее по потокам распределяется поиск значений, соответствующих характеристикам изоляции для каждого слоя. В отдельных потоках рассчитываются массивы значений длин конденсаторных обкладок – h_k , толщин слоев изоляции – Δr_k , радиусов конденсаторных обкладок – r_k , емкостей каждого слоя – C_k . Затем все полученные данные используются для определения максимальной и минимальной напряженности по слоям – E_{max-k} и E_{min-k} .

После того как значения найдены, производится их проверка на допустимость в каждом N -м потоке. Если каждое значение массива E_{max-k} и E_{min-k} проходит проверку, то эти массивы значений отправляются на сравнение вариантов расчета. После сравнения данных по оптимальности принимается лучший вариант расчета и программа выводит на экран или на печать все расчетные значения. Массивы данных, которые не прошли проверку, удаляются программой и больше не участвуют в вычислении.

Предусмотрен случай, в котором все варианты расчета предлагают недопустимый результат, при этом условии программа предложит скорректировать входные значения, и после их изменения будет произведен новый расчет.

Вычислительные эксперименты по ускорению параллельной реализации расчета внутренней изоляции трансформатора

Для проведения численного эксперимента над параллельным вариантом программы использовались интерфейс OpenMP¹ и следующие данные:

- 1) номинальные значения:
 - номинальное напряжение – $U_{\text{ном}} = 110$ кВ;
 - номинальный ток – $I_{\text{ном}} = 850$ А;
- 2) выбираемые параметры:
 - высота верхней части изолятора – $H_v'1 = 0,9$ м;
 - высота верхней части изолятора – $H_v'2 = 0,98$ м;
 - высота верхней части изолятора – $H_v'3 = 0,8$ м;
 - длина нижней части остова – $h_n'1 = 0,5$ м;
 - длина нижней части остова – $h_n'2 = 0,3$ м;
 - длина нижней части остова – $h_n'3 = 0,39$ м;
 - коэффициент запаса – $k_3,1 = 1,18$;
 - коэффициент запаса – $k_3,2 = 1,19$;
 - коэффициент запаса – $k_3,3 = 1,15$;
- 3) допустимая рабочая напряженность – $E_{\text{доп}} = 3,571$ кВ/мм.

В ходе расчета было определено, что второй вариант вычислений не прошел проверку по допустимости напряженностей, соответственно, он не может быть использован в дальнейшей работе программы. Первый и третий варианты расчета прошли проверку по условию допустимости радиальных напряженностей. После сравнения оптимальности был выбран третий вариант.

По полученным данным построен график распределения радиальных напряженностей по слоям (см. рис. 4), по оси абсцисс которого откладывается радиус слоя, а по оси ординат – значение напряженности, соответствующей этому радиусу. В табл. 1–3 представлены длины и радиусы конденсаторных обкладок, а также остальные характеристики, включая продольную, аксиальную, приведенную напряженность, напряженность у токоведущего стержня, радиус стержня, число слоев изоляции.

¹ Жалнин Р. В., Панюшкина Е. Н., Пескова Е. Е., Шаманаев П. А. Основы параллельного программирования с использованием технологий MPI и OpenMP. – Саранск: СВМО, 2013. – 78 с.

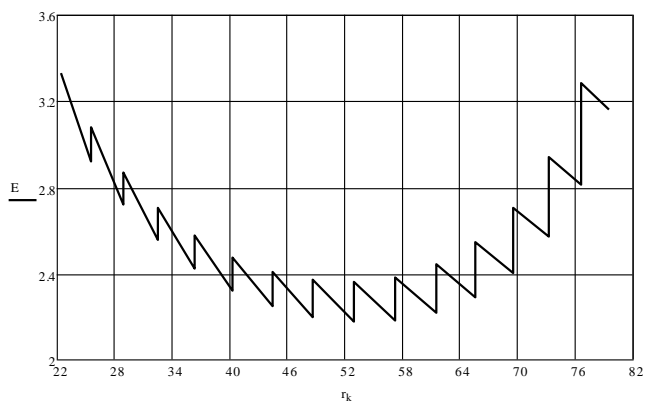


Рис. 4. График распределения напряженности выведенного варианта расчета

Таблица 1

Длины конденсаторных обкладок

№ обкладки, k	Длина, м	№ обкладки, k	Длина, м
1	1,576	14	1,007
2	1,533	15	0,963
3	1,489	16	0,920
4	1,445	17	0,876
5	1,401	18	0,832
6	1,357	19	0,788
7	1,314	20	0,744
8	1,270	21	0,701
9	1,226	22	0,657
10	1,182	23	0,613
11	1,139	24	0,569
12	1,095	25	0,525
13	1,051	26	0,482

Таблица 2

Значения радиусов конденсаторных обкладок

№ обкладки, k	Радиус, мм	№ обкладки, k	Радиус, мм
1	39,98	14	93,977
2	43,093	15	98,301
3	46,348	16	102,604
4	49,743	17	106,866
5	53,272	18	111,067
6	56,930	19	115,186
7	64,599	20	119,202
8	68,592	21	123,094
9	72,676	22	126,841
10	76,838	23	130,423
11	81,065	24	133,819
12	85,342	25	137,010
13	89,651	26	139,122

Рассчитанные характеристики ввода

Продольная напряженность (E_{lv} , кВ/мм)	Аксиальная напряженность (E_{ln} , кВ/мм)	Приведенная напряженность (E_{hs} , кВ/мм)	Напряженность у токоведущего стержня (E_{rc} , кВ/мм)	Число слоев изоляции m	Радиус стержня r_c , м
384,058	590,858	232,762	3,571	26	0,038

Время последовательного расчета параметров составило 1 мин 39 с. Здесь не предусмотрена возможность ввода и выбора оптимального варианта из нескольких наборов входных данных. При этом велика вероятность, что возникнет необходимость проведения повторного расчета, если полученные характеристики не будут удовлетворять допустимым условиям. В результате проведенного численного эксперимента с параллельным поиском характеристик внутренней изоляции ввода время вычислений составило 38 с.

Выводы

В результате исследования создана программная система для автоматизированного проектирования внутренней изоляции высоковольтного ввода трансформатора. В разработанной структуре расчета определены вычислительно сложные участки, к ним относится расчет параметров слоев и напряженностей на слоях изоляции. Поскольку изоляция высоковольтного ввода имеет многослойную структуру, соответствующие вычислительно сложные блоки программного кода были реализованы с участием распараллеливающих директив по технологии OpenMP.

Выполнен численный эксперимент, на основе которого проведен анализ полученных результатов. Показано, что алгоритм расчета характеристик изоляции работает корректно, напряженности на слоях не превышают максимально допустимых значений. Полученные результаты расчета оформлены в таблицы и представлены графически. Параллельный интерфейс OpenMP дает увеличение скорости расчета в 2,6 раза по сравнению с последовательной версией.

В системе достигнут заданный уровень достоверности и точности расчета, ускорен процесс проектирования изоляции. Автоматизация процесса способствует снижению влияния человеческого фактора на возможность совершения ошибки по сравнению с традиционной неавтоматизированной методикой расчета.

Литература

Блинова К. Ю., Аблицов О. И. Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов с помощью системы контроля изоляции трансформаторов (СКИТ) // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам XL студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск: АНС СибАК, 2016. – № 3 (39). – URL: [https://sibac.info/archive/technic/3\(39\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/3(39).pdf) (дата обращения: 21.04.2020).

Буткевич В. Ф., Уразалиев И. Б., Фирсов Д. М. Система онлайн-диагностирования и мониторинга конденсаторов связи 110 кВ и трансформаторных вводов с RIP-изоляцией под рабо-

чим напряжением // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № S4 (11). – С. 22–33.

Жалнин Р. В., Панюшкина Е. Н., Пескова Е. Е., Шаманаев П. А. Основы параллельного программирования с использованием технологий MPI и OpenMP. – Саранск: СВМО, 2013. – 78 с.

Попов Г. В., Игнатъев Е. Б. Об определении индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 4. – С. 54–57.

Свиридов В. А., Бахарев Н. П. Обеспечение электродинамической стойкости силовых трансформаторов // Молодой ученый. – 2017. – № 32 (166). – С. 20–25. – URL: <https://moluch.ru/archive/166/45370/> (дата обращения: 21.04.2020).

Стулов А. В., Трофимович И. А., Тихонов А. И. Разработка САПР силовых трансформаторов на основе автономных библиотек моделирования физических полей и электрических цепей // Пром-Инжиниринг: труды III Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург – Челябинск – Новочеркасск – Владивосток, 16–19 мая 2017 г.). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 78–84.

Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. – Москва: ЛЕЛАНД, 2014. – 528 с.

Тихонов А. И., Стулов А. В., Еремин И. В., Плаксин А. В. Разработка конструкции и методики проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфных сплавов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 6. – С. 57–65.

References

Blinova K. Iu., Ablitsov O. I. Monitoring i diagnostika silovykh transformatorov s pomoshch'iu sistemy kontrolya izoliatsii transformatorov (SKIT) [Monitoring and diagnostics of power transformers using a transformer isolation monitoring system]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletia. Tekhnicheskie nauki: elektronnyi sbornik statei po materialam XL studencheskoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Scientific community of students of XXI century. Engineering sciences: proceedings of XL International student research and practice conference]. Novosibirsk: ANS SibAK, 2016, no. 3 (39). Available at: [https://sibac.info/archive/technic/3\(39\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/3(39).pdf) (accessed: 21.04.2020).

Butkevich V. F., Urazaliev I. B., Firsov D. M. Sistema onlain-diagnostirovaniia i monitoringa kondensatorov sviazi 110 KV i transformatornykh vvodov s RIP-izoliatsiei pod rabochim napriazheniem [System for online diagnosis and monitoring of 110 kV communication capacitors and transformer inputs with RIP isolation under operating voltage]. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transmission and Distribution], 2018, no. S4 (11), pp. 22–33.

Zhalnin R. V., Paniushkina E. N., Peskova E. E., Shamanaev P. A. *Osnovy parallel'nogo programmirovaniia s ispol'zovaniem tekhnologii MPI i OpenMP* [Basics of parallel programming using MPI and OpenMP technologies]. Saransk: SVMO, 2013. 78 p.

Popov G. V., Ignat'ev E. B. Ob opredelenii indeksa tekhnicheskogo sostoianiia silovykh transformatorov v protsesse ikh ekspluatatsii [Calculation of technical condition index of power transformers in operation]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power University], 2014, no. 4, pp. 54–57.

Sviridov V. A., Bakharev N. P. Obespechenie elektrodinamicheskoi stoikosti silovykh transformatorov [Providing electrodynamic stability of power transformers]. *Molodoi uchenyi* [Young researcher], 2017, no. 32 (166), pp. 20–25. Available at: <https://moluch.ru/archive/166/45370/> (accessed: 21.04.2020)

Stulov A. V., Trofimovich I. A., Tikhonov A. I. Razrabotka SAPR silovykh transformatorov na osnove avtonomnykh bibliotek modelirovaniia fizicheskikh polei i elektricheskikh tsepei [CAD design of power transformers based on autonomous libraries for modeling physical fields and electric

circuits]. *Prom-Inzhiniring: trudy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii (Sankt-Peterburg – Cheliabinsk – Novocherkassk – Vladivostok, 16–19 maia 2017 g.)* [Industrial Engineering: proceedings of III International scientific and technological conference (St Petersburg – Chelyabinsk – Novocherkassk – Vladivostok, 16–19 May 2017)]. Cheliabinsk: Izdatel'skii tsentr IuUrGU, 2017, pp. 78–84.

Tikhomirov P. M. *Raschet transformatorov* [Transformer calculation]. Moscow: LELAND, 2014. 528 p.

Tikhonov A. I., Stulov A. V., Eremin I. V., Plaksin A. V. Razrabotka konstruktssii i metodiki proektirovaniia vysokochastotnykh transformatorov s serdechnikom iz amorfnykh splavov [Development of the design and design technique for high-frequency transformers with an amorphous alloy core]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power University], 2018, no. 6, pp. 57–65.

Для цитирования: Ясинский И. Ф., Егоров Д. В. Автоматизация проектирования внутренней изоляции высоковольтного ввода трансформаторов с использованием параллельных технологий // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 4 (97). – С. 89–101. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-4-97-8

For citation: Iasinskii I. F., Egorov D. V. Design automation of internal isolation of high voltage transformers input using parallel computing. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 4 (97), pp. 89–101. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-4-97-8