

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Д. А. Мяндин

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», Москва

В настоящее время при проектировании систем автоматики одним из необходимых и наиболее часто используемых элементов является тороидальный трансформатор.

В ходе проектирования конструкторской документации отдельных узлов систем автоматики, возникает задача точного определения габаритов точных изделий, так как слишком завышенные габаритные размеры приводят к образованию свободного, неиспользуемого пространства внутри блока, а заниженные значения являются технологическим препятствием и могут оказаться нереализуемыми на производстве. Таким образом, при проектировании трансформаторов необходимо как можно точнее обозначить допустимые максимальные габариты, обеспечив при этом как собираемость устройства, так и возможность намотки самого трансформатора.

Актуальность работы заключается в необходимости определения такой информационной системы, которая в результате взаимодействия с пользователем позволит определить желаемую структуру проектируемого трансформатора, его параметры и обеспечит быстрое создание конструкторской документации; а также в разработке новых методов расчета параметров обмотки, учитывающих современные требования к изготавливаемой продукции.

Анализ современного состояния проблемы

Электрический трансформатор – электромеханическое устройство, преобразующее при неизменной частоте переменный ток одного напряжения в другое за счет эффекта электромагнитной индукции. С конструктивной точки зрения тороидальный трансформатор представляет собой магнитопровод (сердечник), изготовленный из материала с высокой магнитной проницаемостью и выполненный в виде тора, на который намотаны две или более изолированные друг от друга обмотки.

Несмотря на свою кажущуюся простоту, тороидальный трансформатор – довольно сложная для математического описания электродинамическая система, о чем свидетельствует тот факт, что за последние полтора века (трансформатор был изобретен в 1876 году) отсутствуют какие либо адекватные ма-

тематические модели, которые позволяли бы автоматизировать процесс расчета и проектирования этого изделия [1].

Кроме того, несмотря на многообразие современных систем автоматизированного проектирования, ни одна из них не позволяет полностью автоматизировать проектирование тороидального трансформатора, начиная от ввода исходных данных и заканчивая оформлением конструкторской документации.

Существующий процесс проектирования основывается на экспериментальных результатах. Задаваемые габариты трансформатора, длина обмоточного провода, коэффициент заполнения окна и другие параметры в конструкторской документации определяются фактическими размерами намотанного образца, а проведение механических итерационных расчетов вручную занимают много времени и неспособны быстро адаптироваться к изменяемым входным параметрам. Отдельного внимания заслуживают процессы создания технических требований для чертежей и другой сопутствующей информации (таблицы обмоточных данных, схемы обмоток, рисунки заделки выводов и проч.).

В связи с этим возникла необходимость сформировать облик системы поддержки принятия конструкторских решений при автоматизированном проектировании тороидальных трансформаторов, которая будет оперативно отслеживать любые изменения, введенные пользователем, производить необходимые вычисления и совершать за него всю многообразную повторяющуюся работу.

Конструктивные особенности тороидальных трансформаторов

Конструкция рассматриваемых трансформаторов представляет собой тороидальный магнитопровод, на который намотаны две или более изолированные обмотки, которые, в свою очередь, электрически и механически соединены с выводными проводами. Зачастую трансформаторы систем автоматики пропитываются различными компаундами и покрываются лаками, для обеспечения электрической и/или механической прочности.

В связи с этим, основными конструктивными параметрами сердечников являются:

- внешний диаметр кольца сердечника;
- внутренний диаметр кольца сердечника;
- высота сердечника;
- радиусы скругления или фаски;
- наличие изоляции;
- шероховатость обрабатываемых поверхностей;
- площадь окна.

После подготовки сердечника к намотке, его необходимо изолировать. Для этого используются бумага или пленка. Число слоев изоляции и толщина и ширина изолирующего материала выбираются исходя из геометрических параметров сердечника и рабочих напряжениях в обмотках.

Обмоточные провода производятся из разных материалов – они могут быть медными или алюминиевыми. В зависимости от типов используемых обмоточных проводов и выводных проводов, для обеспечения электрического и механического соединения применяется пайка или сварка. В случае соединения медных обмоточных проводов и алюминиевых выводных проводов, применяют биметаллические пластины.

Существуют разные виды намотки тороидальных трансформаторов:

- по технологическому признаку они подразделяются на намотку в навал, виток к витку по наружному диаметру и виток к витку по внутреннему диаметру;
- по схематическому признаку обмотки с общей точкой мотают, как правило, двойным проводом, в то время как простые обмотки – одинарным;
- по заполнению окружности трансформатора, обмотки могут располагаться равномерно по наружному диаметру или в определенных секторах;
- по уровням напряжений обмотки могут быть изолированы друг от друга, а в случае большого напряжения многослойные обмотки мотают слоями, прокладывая изоляцию после каждого уровня обмотки.

Для обеспечения дополнительных высоких механических и электроизоляционных свойств трансформатора, используют пропиточные эпоксидные компаунды «горячего» отверждения.

Трансформаторы с межслоевой изоляцией для получения высоких электроизоляционных свойств и высокого коэффициента демпфирования используют полиуретановый компаунд.

Для последующей заливки пеной трансформаторы покрывают лаком.

Выводные провода, подобно обмоточным, также могут быть медными и алюминиевыми. Для придания выводным проводам большей гибкости их пропитывают церезино-масляным компаундом.

Требования, предъявляемые к конструкторской документации на трансформатор

Конструкторская документация – совокупность документов, содержащих данные, необходимые для

проектирования, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации и утилизации изделия [2].

Разработанный комплект конструкторской документации на трансформатор должен полностью соответствовать требованиям ЕСКД и других нормативных документов. Так как в трансформаторах используются обмотки, необходимо учитывать требования, представленные в [3].

Как правило, комплект конструкторской документации на трансформатор состоит из спецификации, чертежа детали сердечника и сборочного чертежа трансформатора.

Правила составления таблицы обмоточных данных и изображения схемы обмотки приведены в [3]. Указания о количестве слоев и витков обмотки, изоляции и бандажа, а также данные об их расположении помещают в технических требованиях или в таблице обмоточных данных, причем порядок расположения данных в таблице должен соответствовать порядку намотки, начиная от каркаса катушки.

Схема обмотки содержит условное изображение сердечника, и все обмотки, с указанием их начала. Количество изображенных на чертеже витков условно; оно может не соответствовать их числу, а также не зависит от числа слоев обмотки и толщины провода.

Выводы и промежуточные отводы обмоток должны иметь одинаковые обозначения с соответствующими выводами и отводами на схеме обмотки.

В технических требованиях указывают данные о намотке, изоляции, пропитке, пайке, сварке, лакокрасочном покрытии, заделке выводов, а также общие требования, допущения и недопущения.

Методы расчета геометрических параметров тороидального трансформатора

В соответствии с разными технологиями намотки существуют разные методы расчета параметров, основными методами являются: интегральный, итерационный и комбинированный метод.

Суть интегрального метода представлена на рис. 1, когда параметры обмотки пересчитываются исходя из коэффициента заполнения.

Итерационный метод показан на рис. 2. Он заключается в последовательном учете каждого витка, наматываемого на сердечник. Как и интегральный, итерационный метод может быть применен как к внутреннему, так и к наружному диаметру магнитопровода. В отличие от интегрального метода, где основой является оптимальное расположение витков в пространстве обмотки, в итерационном методе предполагается слоевая намотка, что особенно полезно при учете межслоевой изоляции.

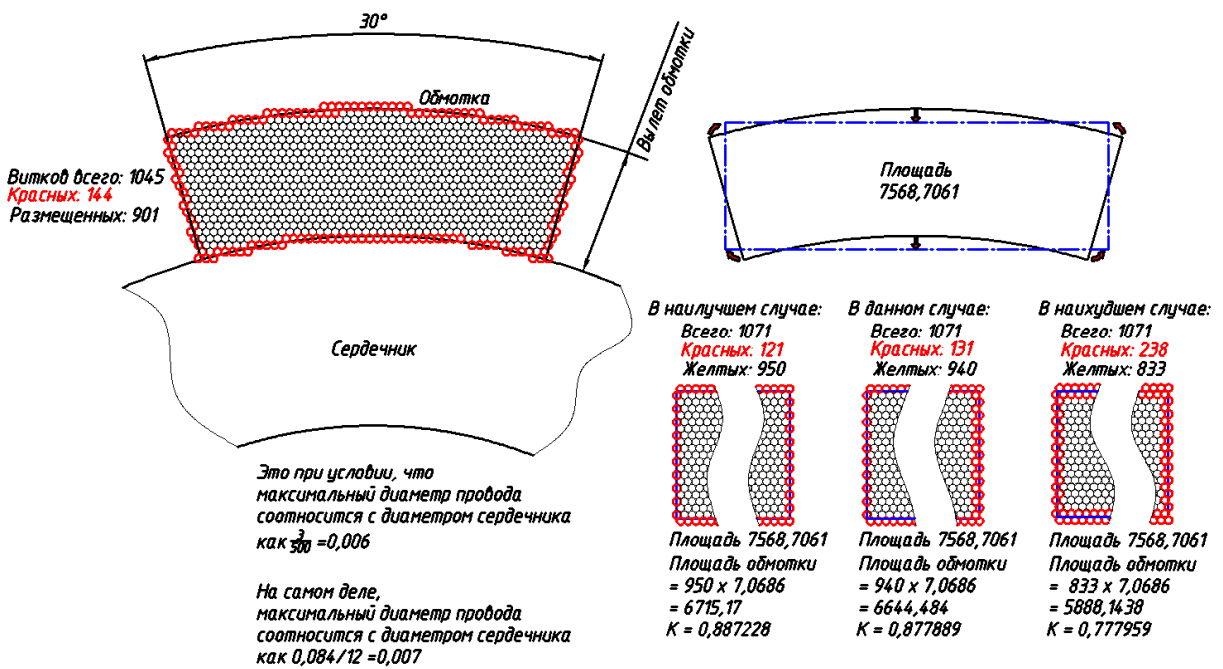


Рис. 1. Интегральный метод

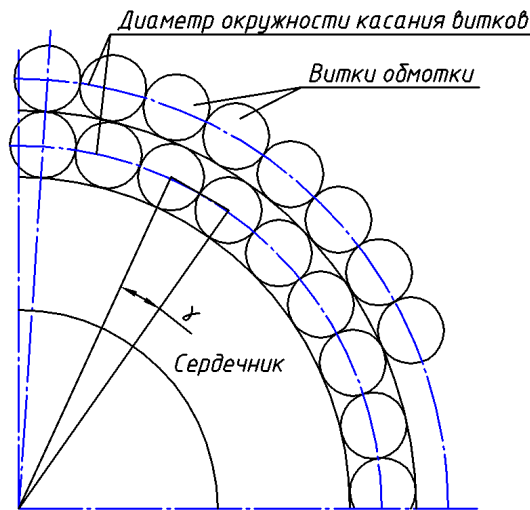


Рис. 2. Итерационный метод

| | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Всего: | Первые четыре ряда: | Пятый ряд: |
| $S = 11,7679$ | $S = 9,5452$ | $S = 2,2227$ |
| $s = 1000 \times 0,0085$ | $s = 870 \times 0,0085$ | $s = 130 \times 0,0085$ |
| $= 8,5$ | $= 7,395$ | $= 1,105$ |
| $k = 0,7223$ | $k = 0,7747$ | $k = 0,4971$ |

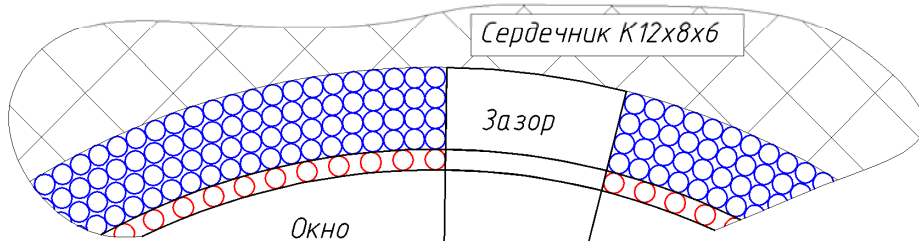


Рис. 3. Распределение витков по слоям

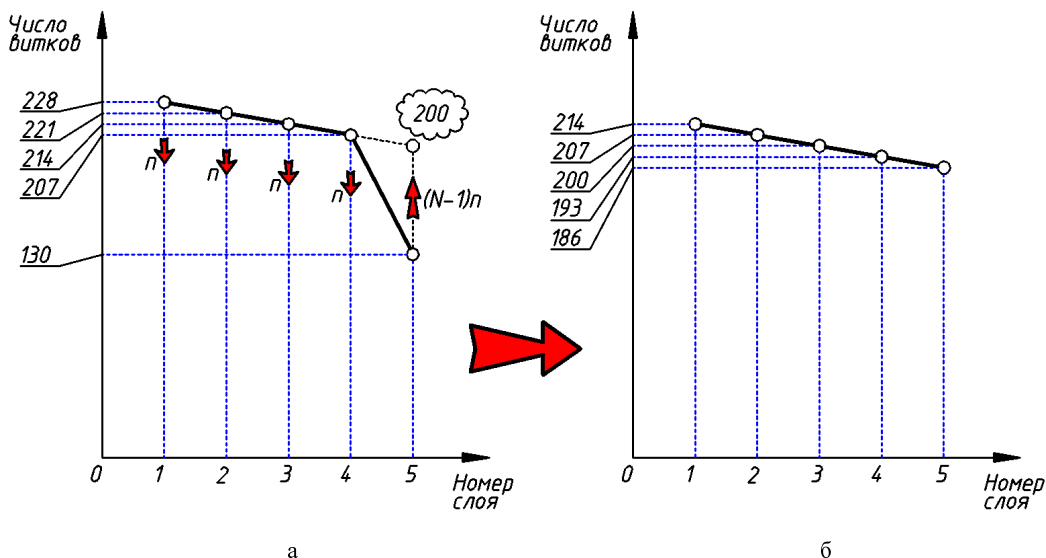


Рис. 4. Усреднение плотности витков на каждом слое: а – до усреднения, б – после усреднения

При проектировании тороидальных трансформаторов зачастую возникает необходимость рассчитывать многослойные обмотки с межслоевой изоляцией. Как правило, такие обмотки представляют собой многovitковые катушки, работающие на относительно высоком напряжении. Для обеспечения электропрочности, эти обмотки мотают в один слой виток к витку по внутреннему диаметру с зазором между началом и концом намотки, а затем изолируют одним или более слоями изоляционного материала. Сложность заключается в том, чтобы обеспечить равномерно убывающее число витков от слоя к слою. Рассмотрим в качестве примера трансформатор, выполненный на сердечнике $K12 \times 8 \times 6$ и содержащий 1000 витков из провода с максимальным диаметром 0,104, к которому предъявляется требование в наличии зазора в 1 мм между началом и концом слоев обмотки.

Используя итерационный метод можно определить, что на первом витке могут разместиться 238 витков, так как необходимо обеспечить зазор в 1 мм на первом слое максимум может уместиться 228 витков, на втором – 221, на третьем – 214, на четвертом – 207, на пятом – 130.

Пояснение к расчету слоевой изоляции представлено на рис. 3 и рис. 4.

Из графика (рис. 4а) отчетливо видно, что количество витков всех слоев, кроме последнего, распределено равномерно и одинаково. Оставшееся количество витков на последнем слое распределено слишком свободно.

Следовательно, необходимо компенсировать плотную загрузку первых четырех слоев за счет последнего таким образом, чтобы распределение витков по всем слоям было равномерным. Это может быть достигнуто за счет последовательного перебрасывания по одному витку с каждого слоя кроме последнего, рис. 4б.

В данном случае, при подобном распределении коэффициент плотности всей обмотки составляет 0,7223; коэффициент плотности первых четырех слоев – 0,7747; коэффициент плотности пятого слоя – 0,4971.

Реализация информационной системы поддержки принятия конструкторских решений автоматизированного проектирования трансформаторов

Система поддержки конструкторских решений должна реализовывать следующие функции:

- ввод входных параметров на основе исходных данных и информации, содержащейся в базе материалов и стандартных изделий (типоразмеры сердечников, параметры изоляционных материалов, параметры обмоточных проводов и их свойства);
- обработка введенных данных и вывод соответствующих исключений. Например, оповещение о недопустимом значении, повторной изоляции уже изолированного сердечника, недопустимости размещения указанного числа витков в окне сердечника и проч.;
- реализация методов расчета параметров тороидального трансформатора на основе введенных данных;
- формирование шаблонов переменных эскизов в формате *.dwg. Под переменными эскизами в данном случае понимается изменяемая графика в конструкторской документации. Например: схема обмотки, таблица обмоточных данных, чертеж детали сердечника. Сборочный чертеж трансформатора получается из габаритной 3d-модели;
- генерирование списка технических требований на основании введенных данных и рассчитанных параметров с возможностью редактирования этого списка;
- создание подробного отчета о всех принятых в ходе проектирования решениях.

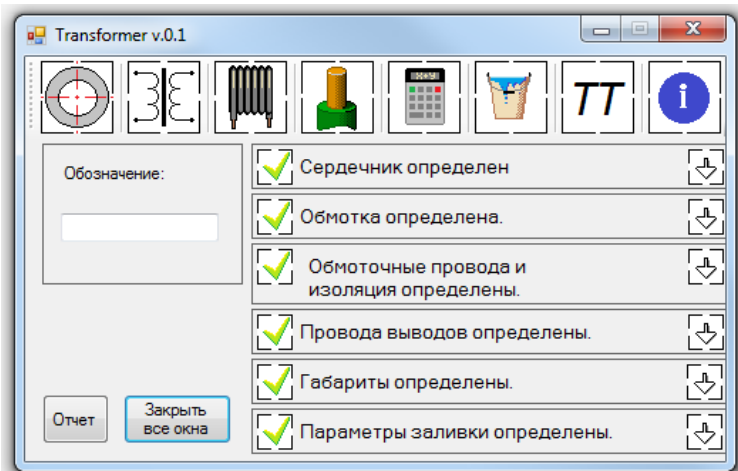


Рис. 5. Главное окно информационной системы

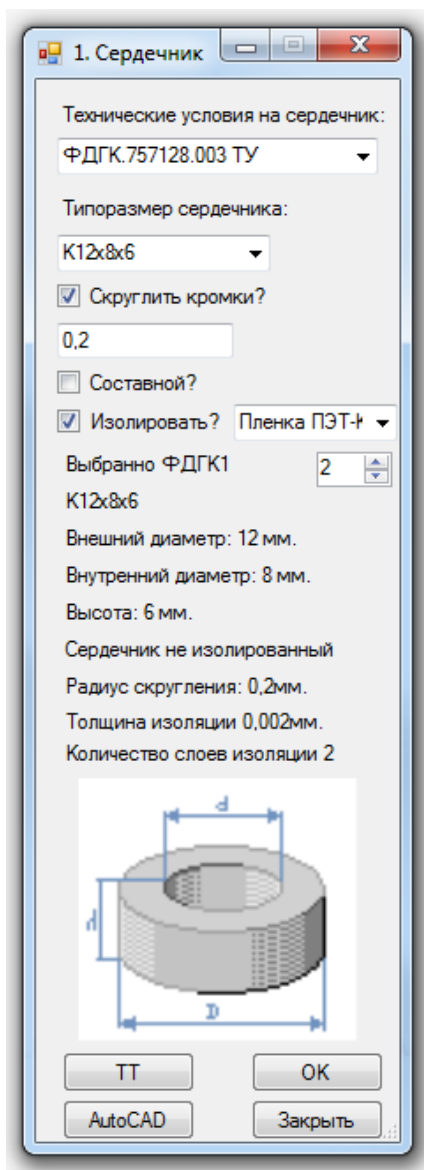


Рис. 6. Определение параметров магнитопровода

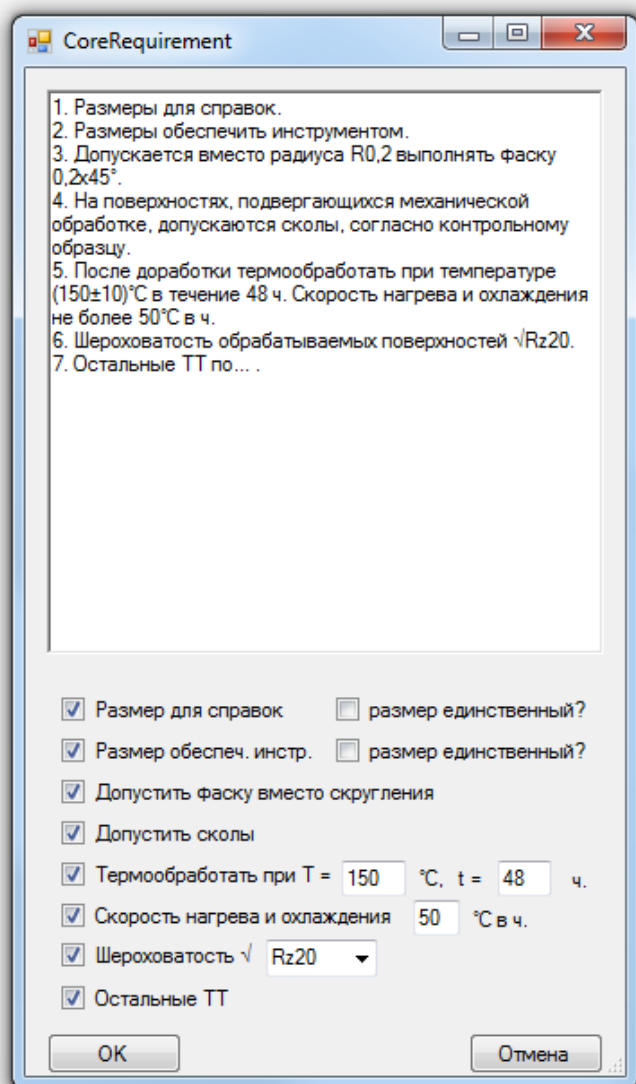


Рис. 7. Список технических требований

На рис. 5 показано главное окно программы, в котором был осуществлен весь процесс проектирования.

Окно определения параметров магнитопровода показано на рис. 6. В нем разработчик выбирает из списка технические условия и типоразмер сердечника, указывает радиус скругления кромок, материал и число слоев изоляции (при необходимости). Так же имеется возможность определить список технических требований (рис. 7) и автоматически начертить эскиз для чертежа детали.

После того как все параметры указаны верно, при нажатии кнопки «ОК» на главном окне про-

граммы появится уведомление о том, что параметры сердечника успешно определены (для более подробного отчета можно развернуть раскрывающийся список).

В программе предусмотрена автоматическая проверка величины радиуса скругления. В случае если радиусы превысят половину высоты сердечника, выдается соответствующее предупреждение, приостанавливающее выполнение программы до тех пор, пока неисправность не будет устранена. Также при изоляции уже изолированного сердечника разработчик будет уведомлен о намерении своих действий, но тем не менее сможет продолжить работу.

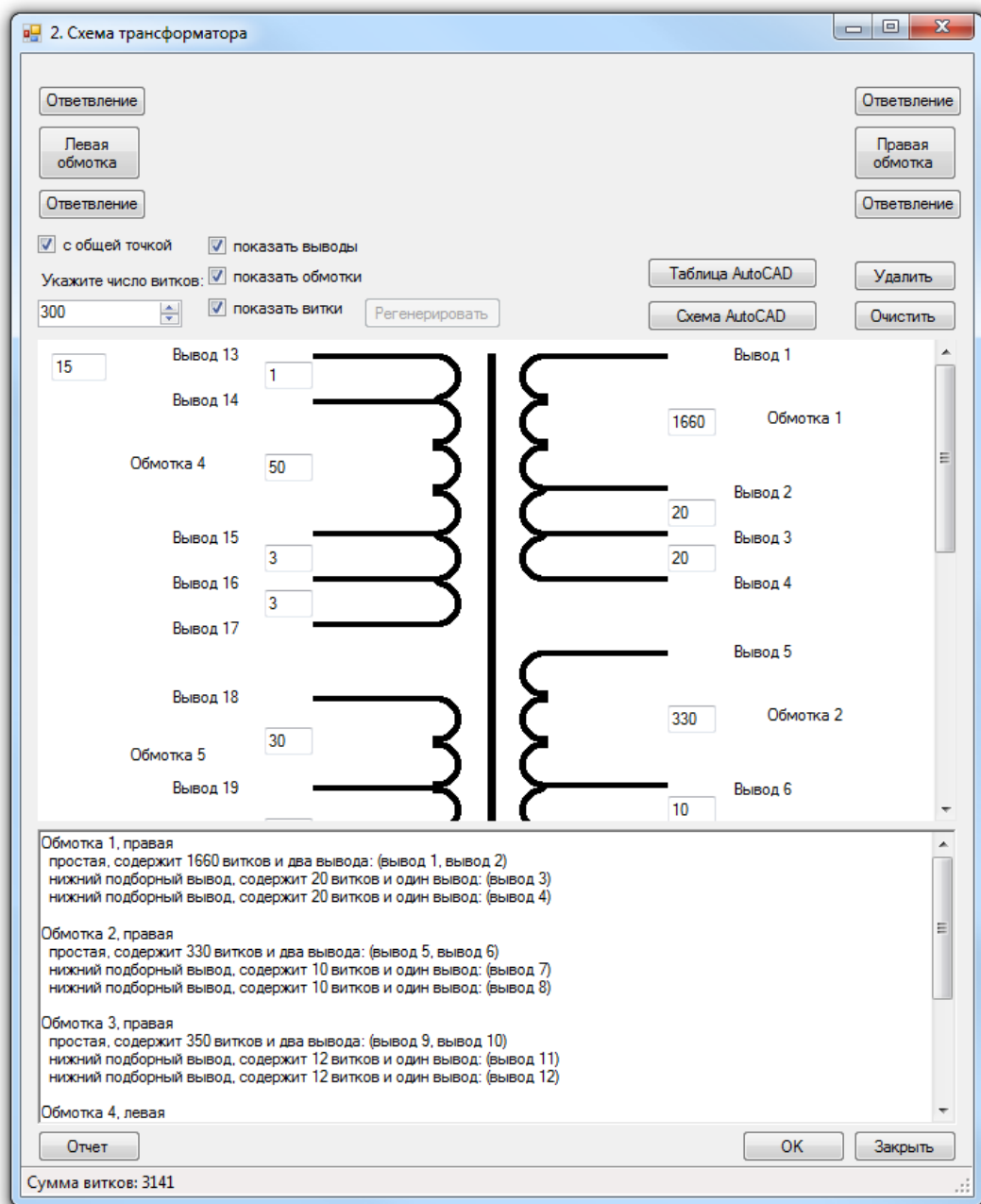


Рис. 8. Конструктор схемы обмоток трансформатора

В случае если выбрана функция «Составной» – кромки скругляются только с одной стороны, что отражается в эскизе заготовки.

При составлении списка технических требований можно выбрать необходимые пункты из перечня наиболее часто используемых требований. Пункты технических требований при этом нумеруются автоматически. Не исключена возможность ручной корректировки.

После определения сердечника идет этап определения схемы обмотки трансформатора. В данном случае программа предлагает построить схему из набора разных типов обмоток: простых (правых и левых), с общей точкой (правых и левых), верхних и нижних подборных выводов, с указанием количества витков. При этом программа автоматически производит нумерацию обмоток и выводов и составляет текстовый перечень сконструированной обмотки и подсчитывает общее число витков трансформатора. Пример составленной схемы обмотки представлен на рис. 8.

Также реализована возможность удалить последний созданный элемент или очистить область построения.

После составления схемы обмоток трансформатора автоматически генерируются объекты, содержащие в себе информацию об обмоточных проводах, изоляционном материале и проводе выводов. Выбор осуществляется из представленных списков и сохраняется в памяти системы.

Определив параметры сердечника, структуру и количество обмоток, изоляцию между обмотками, параметры обмоточного и выводного проводов, система обладает всеми параметрами для расчета геометрических характеристик по методикам, приведенным в предыдущем разделе. Определив параметры намотанного трансформатора, начинается процесс выбора и расчета заливки и пропитки.

Завершающим этапом автоматизированного проектирования конструкции трансформатора является создание списка технических требований. Для

этого разработчику нужно выбрать те пункты, которые на его взгляд необходимо включить в этот список. Все пункты делятся на шесть категорий: параметры магнитопровода, параметры обмоток и выводов, параметры пайки, параметры пропитки и заливки, общие параметры и допущения.

Заключение

В настоящей работе были рассмотрены основные конструктивные особенности проектирования тороидальных трансформаторов и требования, предъявляемые к конструкторской документации, приведены новые методы расчета конструктивных параметров и реализована информационная система автоматизированного проектирования, обладающая пользовательским интерфейсом, и позволяющая значительно сократить сроки разработки конструкции рассматриваемого класса изделий за счет автоматизации как вычислительных процессов, так и непосредственного создания эскизов и прочих графических объектов, являющихся неотъемлемой частью комплекта конструкторской документации.

В заключение стоит отметить, что проектирование тороидальных трансформаторов не ограничивается приведенными методами, однако созданная информационная система позволяет расширять и дополнять свой инструментарий новыми способами расчета и другими техническими требованиями, которые по тем или иным причинам не учтены в данной исходной версии программы.

Литература

1. Котенёв С. В., Евсеев А. Н. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2011.-287 с.: ил.
2. ГОСТ 2.001-2013 ЕСКД. Общие положения.
3. ГОСТ 2.415-68 ЕСКД. Правила выполнения чертежей изделий с электрическими обмотками.