

# Цифровой автомат для расчета кабелей из «первых принципов»

**Разработана VBA-программа, позволяющая превратить персональный компьютер в быстрый, удобный, точный и универсальный цифровой автомат для расчетов параметров кабелей связи из «первых принципов», требующий лишь элементарных навыков работы с таблицами Excel.**

В последние годы появился ряд публикаций, посвященных необходимости применения в расчетах кабелей новейших численных методов. Вот, к примеру, мнение ведущего научного сотрудника ВНИИКП [1]:

*«Традиционные методы расчета, реализованные на компьютере, повышают скорость вычислений, но приводят к тому же результату, что и расчеты на калькуляторе. Следовательно, для использования возможностей компьютера подход, постановка и формулировка задач конструкторского расчета кабеля должны быть иными. Можно учесть разные особенности кабеля и повысить точность метода и выполнение расчетов практически до любого уровня. Расчеты стали автоматизированными, открывается возможность проводить многовариантные расчеты (ставить математический эксперимент) и по ним выбирать наиболее подходящую конструкцию».*

Несколько ранее этому была посвящена серия статей в журнале «КАБЕЛЬ-news» за 2006-2008. Где, в частности, с помощью расчетов в программной среде ELCUT были выявлены существенные ошибки упомянутых выше традиционных методов, а в ряде случаев — даже полная их несостоятельность [2]. Основной вывод тот же: насущно необходим переход к расчетам из «первых принципов».

Например, моделирование электромагнитных полей (ЭМП) методом конечных элементов, реализованном, в частности, в пакете ELCUT. Однако, было указано, что ELCUT требует существенного дополнения [3], а более полный опыт работы с ним показал, что, при всех его несомненных достоинствах, один он вряд ли может быть рекомендован в

качестве доступного и быстрого расчетного средства:

- во-первых, работа в ELCUT требует большого количества кропотливой ручной работы оператора. В том числе, множества подготовительных вычислений и ввода десятков и сотен директив, необходимых для построения геометрической модели ELCUT, задания ее свойств, формулировки счетного задания, запуска счета, организации вывода данных, их фиксирования и надлежащей интерпретации. И все без единой ошибки. И, к слову, в этом смысле ELCUT еще и очень прост и удобен. Для сравнения в среде ANSYS все это намного сложнее;

- во-вторых, ELCUT решает лишь прямые и достаточно общие задачи: по заданным геометрическим размерам и свойствам материалов вычисляет распределение ЭМП в кабеле. И потому необходимо выполнение еще множества финишных программных, директивных и вычислительных операций, чтобы получить требуемую для кабельной технологии информацию:

- о первичных параметрах изделий: емкости  $C$ , индуктивности  $L$ , сопротивлению  $R$  омических и проводимости  $G$  диэлектрических потерь,

- о вторичных: волновом сопротивлении  $Z$ , скорости сигнала  $V$  и его затухания  $Att$ .

Но, основная трудность даже не в этом, а в том, что на практике приходится решать обратные задачи. Скажем, по заданному значению  $Z$  и электрическим свойствам материалов, вычислять геометрические параметры изделий. К примеру, толщину изоляции жил  $\Delta_{из}$ . Для чего ни ELCUT, ни, тем более, другие программные пакеты решительно не приспособлены.

И вообще, отсутствует общеизвестный аналитический или другой точный алгоритм решения кабельных задач подобного рода. Так что, приходится применять метод проб и ошибок — вводить некоторые пробные входные параметры изделия, решать прямую кабельную задачу, вычислять выходной параметр (скажем,  $Z$ ), сравнивать с заданным, менять, если необходимо, входные данные и т.д.

В результате расчет даже самых простых конструкций превращается в весьма трудоемкий процесс, требующий от расчетчика достаточно высокой квалификации и чутья. Скорее всего, именно эти обстоятельства и являются в настоящее время основным тормозом для массового применения в практике расчета кабелей подобных компьютерных вычислительных пакетов.

Целью настоящей статьи является демонстрация разработанного авторами алгоритма автоматизированного расчета из «первых принципов» на примере однопарных экранированных кабелей связи.

Для неизощренного в компьютерных программах пользователя, применение этого алгоритма означает, что достаточно ввести в таблицы Excel необходимые для расчетов данные и запустить процесс. Далее алгоритм берет на себя управление работой ELCUT и решением поставленного технологического задания (например, получение кабеля с  $Z = 100 \text{ Ом}$ ).

Помимо прочего, необходимость разработки такого инструмента вызвана особой сложностью расчета изделий, предназначенных для специальных, например, для пожаровзрывоопасных условий. У них, помимо специальных требований (искро-, взрыво- и пожаро- безопасности, и/или огнестойкости), есть еще множество и обычных нормативов: на емкость, индуктивность, затухание, волновое сопротивление и т.п. К этому надо добавить и возможную весьма высокую цену ошибок.

Так, ошибки грубого расчета кабеля традиционными методиками с последующим натурным производственным подгоном технологических режимов, превращают процесс разработки кабелей в долгую, а зачастую очень дорогую и мучительную задачу.

А ведь правильно сконструированный кабель — это не только залог минимизации расходов при постановке его на производство и серийный выпуск, но и залог эксплуатационной надежности системы, где он будет применен.

### Процедура расчета с помощью программ математического моделирования электромагнитных полей

Известно множество пакетов программ для моделирования ЭМП методом конечных элементов: ANSYS, FEMM, ELCUT, Elmer, FEMLAB, Ansoft и т.д.

ELCUT — один из самых простых, удобных и доступных.

Ниже приведена примененная нами схема прямых расчетов с помощью ELCUT. Она включает ряд этапов.

- 1) Выбор конструкции и задание исходных параметров.
- 2) Ввод данных в ELCUT. Задание частоты ЭМП.
- 3) Построение в ELCUT геометрической модели.
- 4) «Подключение» узлов модели к электрическим цепям ELCUT.
- 5) Решение ELCUT задачи для магнитного поля переменного тока.
- 6) Извлечение из ELCUT данных для вычисления импеданса кабеля.

$$Z = j\omega L + R$$

- 7) Вычисление индуктивности и сопротивления омических потерь.

- 8) Решение задачи для электрического поля переменного тока для заданного напряжения между жилами  $U$ .

- 9) Извлечение из ELCUT величины тока между жилами:

$$J = (j\omega C + G) U$$

- 10) Вычисление величин емкости  $C$ , проводимости диэлектрических потерь  $G$  и действующего тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta^* = G/\omega C$ .

- 11) Вычисление величин  $Z$ ,  $V$ ,  $\text{Att}$  по формулам, предложенным в [4-6].

### Автоматизированная процедура расчета кабелей

Для создания автоматизированной процедуры расчета параметров кабеля мы воспользовались тем удачным обстоятельством, что в ELCUT предусмотрен обширный инструментальный Active Field, с помощью которого ELCUT может быть внедрен в проекты Visual Basic for Application — VBA. В том числе программируемые в виде макросов таблиц Excel (а также редактора Word, пакета Work Bench и других программных сред).

Рис.1. Конструкция уединенной экранированной пары с корделями, ТПЖ которой скручиваются из семи проволок:

- 1 — ТПЖ;
- 2 — изоляция;
- 3 — дренажный проводник;
- 4 — экран;
- 5 — кордель;
- 6 — воздушные пустоты;
- 7 — оболочка.

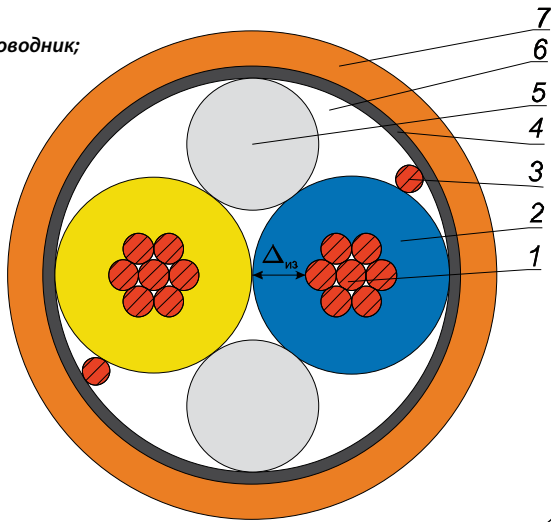


Рис.2. Фрагмент таблиц Excel.

Желтые ячейки — входные параметры кабеля.

Зеленые — выходные.

Кнопка ELCUT — запуск процедуры подбора  $\Delta_{из}$  для получения  $Z = 100$  Ом.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		Волновое сопротивление	Z	Ом	100				
3		Сечение ТПЖ	$S_{ТПЖ}$	мм <sup>2</sup>	1				
4		Диаметр дренажа	$d_{дрен}$	мм	0,4				
5		Толщина экрана	$\Delta_{экр}$	мм	0,1				
6		Частота	f	МГц	1				
7		Диэлектрич. проницаемость	$\epsilon$		4				
8		Тангенс угла диэл. потерь	tg $\delta$		0,02				
9		Толщина оболочки	$\Delta_{об}$	мм	0,5				
10		Проводимость жилы	$\sigma_{ТПЖ}$	Сим/м	5,40E+07				
11		Проводимость экрана	$\sigma_{экр}$	Сим/м	3,72E+07				
12		Проводимость дренажа	$\sigma_{дрен}$	Сим/м	5,40E+07				
13		Погрешность расчета	$\delta$	%	0,02				
14		Экран		круглый					
15									
16		ELCUT							
17									
18									
19		Zo	$S_{ТПЖ}$	$\Delta_{из}$	$d_{дрен}$	$\Delta_{экр}$	f	$\epsilon$	tg $\delta$
20		Ом	мм <sup>2</sup>	мм	мм	мм	МГц		мГн/км
21		99,99	1	1,70	0,4	0,1	1	4	0,02
22									
23									
24									

Пусть, к примеру, надо изготовить кабель с  $Z = 100$  Ом (1МГц) из пары семипроволочных жил (1 мм<sup>2</sup>), при наличии ПВХ-корделей (рис. 1).

Вопрос: какая для этого должна быть толщина ПВХ-изоляции жил (назовем это регулируемым параметром), при выполнении еще и ряда дополнительных условий: толщины алюминиевого экрана 100 мкм, диаметра дренажной проволоки 0.4 мм и др.?

Разработанный нами алгоритм позволяет решить эту задачу не выходя из Excel. На рис. 2 представлен фрагмент листа таблиц, в котором желтым выделены ячейки для ввода данных, зеленые — для вывода.

Здесь сразу отметим, что для наглядности в таблице приведена лишь одна желтая колонка (вектор) входных данных единичного задания (маркорумера). На самом деле их может быть произвольное количество. Например, можно задать ряд сечений жил 0.5, 0.75, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 мм<sup>2</sup>, ряд значений  $\epsilon = 1, 1.2, 1.6, 2.5, 3, 4, 5$  и соответствующих им tg $\delta$ , ряд значений толщины экрана 20, 50, 100 мкм и т.д.

Исходя из «желтых» данных, Excel вычисляет геометрические размеры деталей заданной конструкции кабеля и ждет срабатывания виртуальной кнопки ELCUT (рис. 2).

Она запускает макрос-автомат Excel, управляющий работой ELCUT. На рис. 3 представлен алгоритм работы автомата. Его ядро — решение прямой кабельной задачи в ELCUT.

Для этого Excel направляет ему размеры и свойства деталей кабеля — блоков геометрической модели, свойства ребер (границ этих блоков), шаги сетки конечных элементов, рабочую частоту и другие необходимые для работы данные.

ELCUT строит геометрическую модель, вычисляет электрическое и магнитное поля кабеля на заданной частоте и направляет в Excel данные для вычисления первичных (L, R, C, G) и вторичных (Z, V/c, Att) параметров конструкции.

Excel сравнивает целевую функцию (в данном примере — Z) с заданием. Если погрешность расчета больше заданной  $\delta$ , Excel изменяет регулируемый параметр (в данном примере —  $\Delta_{из}$ ), пересчитывает геометрию всей конструкции и запускает цикл следующей итерации.

Иначе Excel записывает найденные на последней итерации параметры кабеля в зеленые ячейки, производит выборку новых входных параметров и запускает следующий расчет. И так до исчерпания всех входных данных.

Для реализации этой стратегии в алгоритме предусмотрены две цепи обратной связи. Внутренняя цепь замыкает цикл прямой кабельной задачи. Эта связь отрицательная, и оборудованный ею цифровой автомат приобретает способность решать обратную кабельную задачу (в данном примере — путем подбора величины регулируемого параметра модели  $\Delta_{из}$  для выполнения целевой функции  $Z = 100 \text{ Ом}$ ).

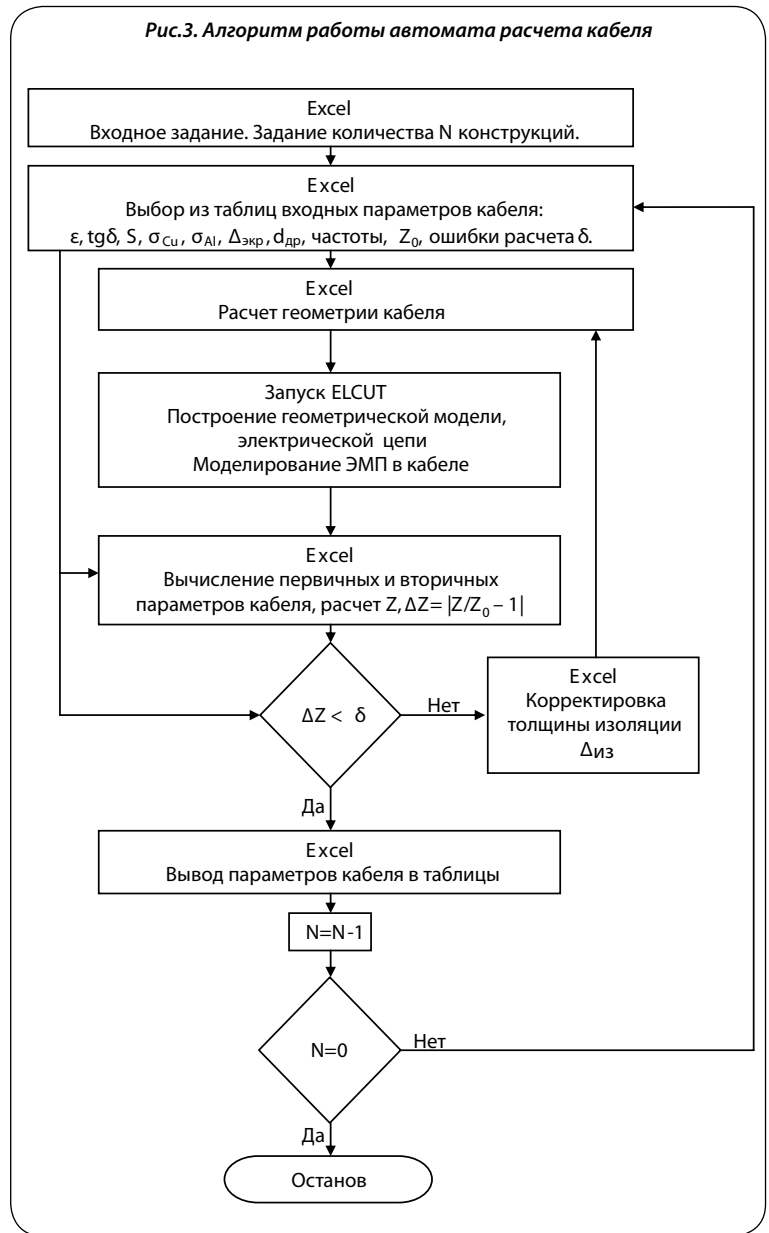
Отметим попутно, в теории автоматического регулирования (управления) этот автомат представляет собой достаточно интересный объект. И подробное изучение его свойств окажется достаточно актуальным уже в самом ближайшем будущем (с точки зрения устойчивости, сходимости, динамических и других ошибок, а также применения методов нелинейной оптимизации).

Внешняя цепь обратной связи переключает расчетные задания, для того чтобы автомат был способен самостоятельно изменять вектор входных параметров ( $Z$ ,  $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$ , сечение жил и т.д.), а также выбирать конструктивные особенности (например, переходил от овального экрана к круглому). То есть, «за одну установку» выполнял не одно, а несколько десятков и даже сотен единичных заданий, последовательно заполняя строку за строкой зеленые ячейки таблицы Excel (рис. 2). Это также существенно экономит время расчетчика. Не только освобождая его от ручных операций, связанных с формулировкой задач ELCUT, но, что еще важнее, и от чисто человеческих ошибок. Включая и такие неприятные, как повторы, пропуск заданий, перепутывание компонентов входного вектора и т.п. И обеспечивает минимальное время серийного расчета однотипных конструкций (например, показанных на рис.1)

Отметим, что для первой итерации Excel вычисляет  $\Delta_{из}$  с помощью традиционных формул, рекомендованных в [4-6]. Помимо прочего, это позволяет каждый раз находить ошибку традиционного расчета. В результате оператор может набирать ценный опыт. Например, фиксировать конструкции, у которых «традиционные» расчетные ошибки незначительны. И в любом случае фиксировать поправки для их устранения, поскольку ошибки эти — по сути систематические.

Для последующего уточнения  $\Delta_{из}$  разработан специальный алгоритм. Он обеспечивает заданную точность вычислений за 3-4 цикла итераций и выполнение единичного задания в целом в течение не более 1...2 минут. То есть за считанные минуты становится возможным произвести, по сути, це-

Рис.3. Алгоритм работы автомата расчета кабеля

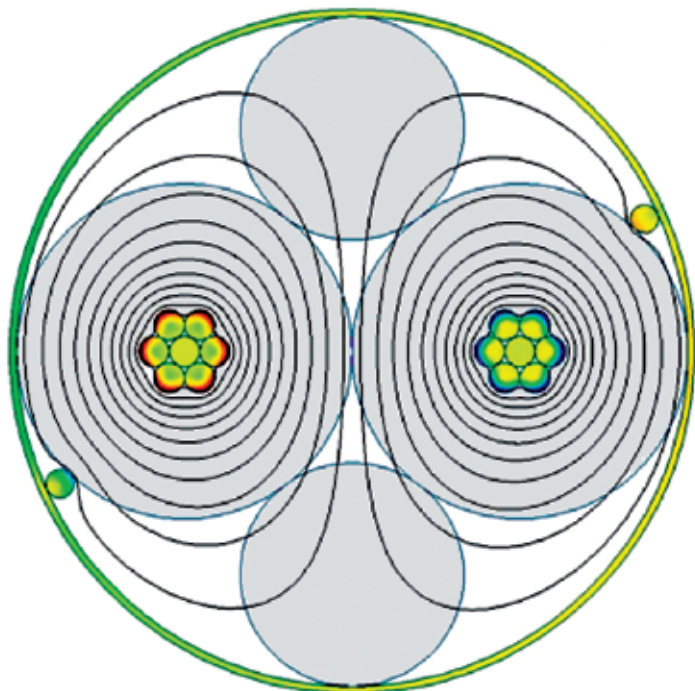


левой расчет параметров кабеля заданной марки. Отметим, что в «ручном режиме» на это могут уйти многие часы.

Целевой функцией может быть не только  $Z$ , но и вообще любой из выходных параметров, равно как их комбинация. Регулируемыми также могут быть выбраны любые входные параметры (здесь — один, но алгоритм нетрудно обобщить на большее число). Это придает автомату дополнительную универсальность.

Специальными директивами (на рис. 2 не представлены) в Excel могут быть вызваны цветные и рельефные карты ЭМП для любой частоты. Например, магнитного поля на частоте 1 МГц (рис. 4).

Рис.4. Рельефная карта магнитного потенциала (черные линии) и цветная карта распределения токов (теплые тона — положительное направление)



## Заключительные замечания

Внимательный читатель может заметить, что в статье обойден ряд важных вопросов. Скажем, учет скрутки. Дело в том, что, как указано в [7], для этого необходима специальная и достаточно сложная процедура. Так что этот вопрос заслуживает отдельного обстоятельного обсуждения. Отметим лишь, что описанный здесь алгоритм применим и для расчетов параметров кабелей с учетом скрутки.

Не сказано о наводках и помехах. Это связано с тем, что для статьи выбрана простейшая версия автомата, предназначена для расчета однопарных экранированных кабельных структур, надежно защищенных от внешних помех при практически полном отсутствии внутрикабельных.

С другой стороны, хотя сам по себе расчет наводок в среде ELCUT трудностей не представляет, для расчета помех требуется специальный математический аппарат. Не смотря на это, и здесь легко и удобно использовать принципы и возможности автомата. Но это заслуживает отдельного разговора.

В целом разработанный алгоритм, его программная реализация и перспективные программные

дополнения превращают персональный компьютер в быстрый, точный и удобный цифровой автомат для расчета параметров кабелей из «первых принципов», а также их конструирования для обеспечения широкого набора целевых назначений. Здесь — однопарных кабелей, а при надлежущей модификации — практически для любых конструкций и для любых целей.

В перспективе цифровой автомат может быть полезен для реализации числовых кабельных технологических экспериментов, а также как составная часть числовых моделей процесса производства кабелей в целом. Равно как для привлечения к расчетам кабелей иных, помимо ELCUT, программных средств.

## Литература

1. К.К. Абрамов. Модель конструкции обобщенно кабеля связи. «Кабели и провода», №2 (108), 2008, с.13-18.
2. Е.М. Вишняков, Д.В. Хвостов. Несостоятельность некоторых традиционных методов расчета емкостных параметров триад и трехфазных кабелей. «КАБЕЛЬ-news», №12-1, 2008.
3. Е.М.Вишняков, Д.М.Хвостов. Расчет межпроводниковой индуктивности и емкости симметричных прямых пар методами конформных отображений и конечных элементов. «Кабель» № 3, 2007
4. В.Е. Власов, Ю.А. Парфенов. Кабели цифровых сетей электросвязи. Конструирование, технологии, применение. — М.: Эко-Трендз, 2005. — 216 с.
5. И.И. Гроднев, С.М. Верник. Линии связи. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1988. — 544 с.
6. Основы кабельной техники: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Леонов, [и др.]; под ред. И.Б. Пешкова. — М.: Изд. Центр «Академия», 2006. — 432 с.
7. Е.М. Вишняков, Д.В. Хвостов. Влияние скрутки и других нарушений осевой симметрии кабельных конструкций на скорость распространения сигналов. «КАБЕЛЬ-news», №6-7, 2007

**Хвостов Д.В.** — генеральный директор  
ЗАО «СИМПЭК», г. Москва.

**Вишняков Е.М.** — старший преподаватель  
Озерского Технологического института  
(филиал МИФИ).

**Никулин А.В.** — студент-дипломник кафедры  
«Конструирования и технологии электрической  
изоляции» Пермского государственного  
технического университета.