

# Влияние скрутки на (межпроводниковую) ёмкость витых пар и триад.

Вишняков Е.М., Озёрский технологический институт (филиал) МИФИ  
Хвостов Д.В., ЗАО «Самара-Импэкс-Кабель», Москва

Ранее [1] мы сообщали о применении пакета программ **ELCUT** на примерах решения некоторых простейших кабельных задач. Там же сказано следующее:

*Даже первое знакомство с **ELCUT** убеждает в полезности этого инструмента в инженерной деятельности. Но есть и ограничения области его применения:*

- *конечный размер геометрических моделей,*
- *решение двумерных задач.*

*Второе ограничивает тем, что кабельные объекты – существенно трёхмерные. Это связано с тем, что при сборке сердечников кабелей их токопроводящие жилы, как правило, скручивают между собой. Равно как и сами жилы, если их свивают из нескольких (7, 19 и т.д.) проволок. И потому, на первый взгляд, применение **ELCUT** здесь невозможно.*

*Тем не менее, обе эти задачи здесь могут быть решены: как точный расчёт неэкранированных кабельных конструкций, так и оценка влияния всех видов скруток.*

В [1] показано, как с помощью конформных отображений снять первую проблему.

Цель настоящей работы – показать, как решить вторую проблему на примере расчёта ёмкости витых пар и скрученных многопроволочных жил.

Поскольку расчёт реальной конструкции – процедура достаточно сложная, для наглядности здесь решён ряд более простых задач. Что и обусловило изложение материала в следующей последовательности.

Сначала обсуждена роль винтовой симметрии в решении поставленной задачи.

Затем изложены результаты расчётов геометрического и полевого эффектов скрутки на межпроводниковую ёмкость однопроволочных круглых жил.

Потом исследована ёмкость многопроволочных не скрученных жил. В том числе влияние их геометрии и угловой ориентации.

И, наконец, влияние скрутки проволок на ёмкость многопроволочной жилы.

## Полевое уравнение с учётом скрутки жил в сердечнике кабеля.

При сборке сердечников кабелей производят операцию скрутки жил, чтобы обеспечить требуемую гибкость конструкций [2] и продольную однородность свойств. То же – при сборке жил из 7 и более проволок (рис. 1 внизу).

Скрутку характеризуют углом наклона  $\beta$  жилы (проволоки) относительно оси  $z$  сердечника (жилы). Где  $\operatorname{tg}\beta = \alpha b$ ,  $\alpha = 2\pi/s$ ,  $s$  – шаг скрутки,  $b$  – расстояние от оси жилы (проволоки) до оси сердечника (жилы). У обычных кабельных конструкций  $\beta \sim 0.1 \dots 0.3$ .

Скрутка меняет величину погонных параметров: ёмкостей, индуктивностей, потерь. Скажем, сопротивление растёт хотя бы из-за увеличения  $\Delta D$  длины  $D$  повиваемых проводов:

$$\Delta D = D/\cos\beta - D \approx D \beta^2/2 \quad (1)$$

Как видно, здесь характерна квадратичная зависимость от угла скрутки.

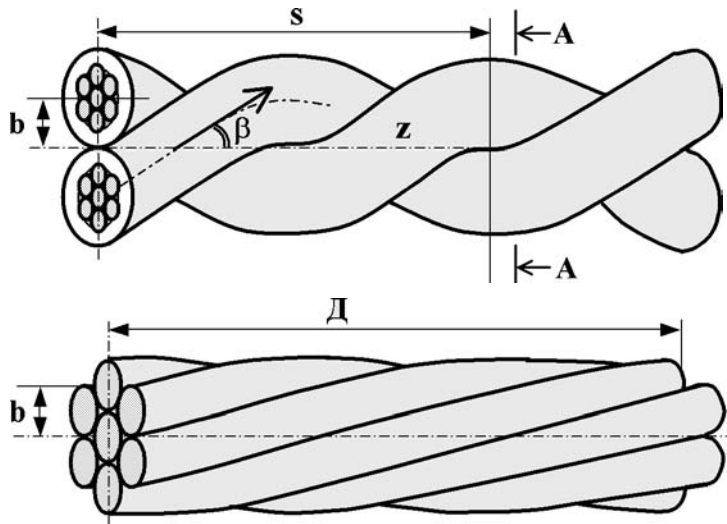


Рис. 1. Схема скрутки витых пар в сердечнике (вверху) и многопроволочных жил (внизу).

Ёмкость проводников изменяется как из-за изменения их геометрии, так и вследствие «разбухания» сердечника (рис. 2). Есть и другие причины, которые рассмотрим ниже.

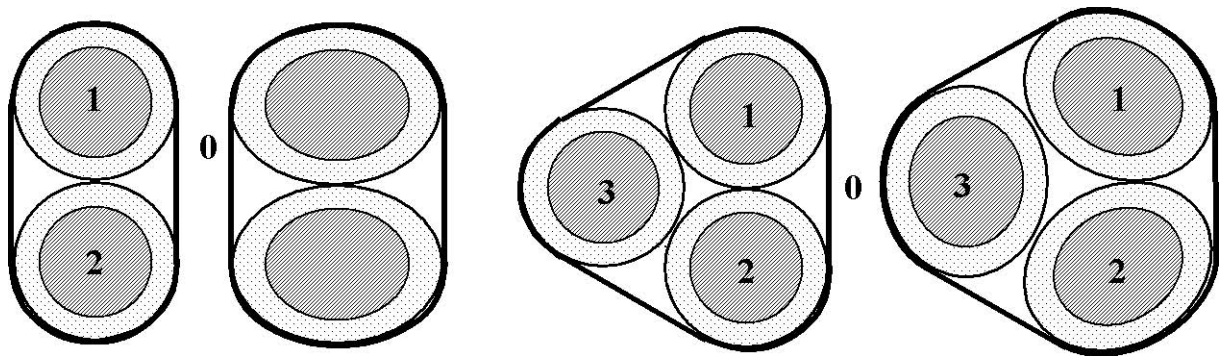


Рис. 2. Поперечные разрезы кабелей (сечение А-А). Слева направо: прямой симметричной пары, витой симметричной пары, прямой триады, скрученной триады. Жирные линии – металлические экраны.

В целом сложность расчёта ёмкости и других параметров таких объектов связана с тем, что скрутка нарушает симметрию конструкций (и, следовательно, описывающих их уравнений) относительно операции переноса вдоль их оси  $z$ . И потому, вообще говоря, надо решать трёхмерную задачу для потенциалов  $U(\mathbf{r}, \psi, z)$  и  $A(\mathbf{r}, \psi, z)$  электрического и магнитного полей ( $\mathbf{r}$  – радиус,  $\psi$  – угол):

$$(\mathbf{r} U_{\mathbf{r}})_{\mathbf{r}} / r + U_{\psi\psi} / r^2 + U_{zz} = 0 \quad (2)$$

Здесь индексами  $\mathbf{r}$ ,  $\psi$ ,  $z$  обозначены производные. Есть, однако, упрощающее обстоятельство. Дело в том, что для большинства кабельных сборок характерен постоянный шаг скрутки. Что обуславливает наличие у них винтовой симметрии, то есть симметрии относительно операции переноса вдоль оси  $z$  и поворотом вокруг неё на угол  $\alpha z$ . Математически это равносильно замене переменной  $\psi$  на  $\varphi = \psi - \alpha z$ :

$$(\mathbf{r} \varepsilon U_{\mathbf{r}})_{\mathbf{r}} / r + (\varepsilon U_{\varphi\varphi})_{\varphi} / r^2 + \alpha^2 U_{\varphi\varphi} + U_{zz} = 0 \quad (2')$$

Так как для малых частот ( $\ll 1$  ГГц) слагаемым  $U_{zz}$  можно пренебречь, то трёхмерная задача (2') сводится к двумерной:

$$(\mathbf{r} \varepsilon U_{\mathbf{r}})_{\mathbf{r}} / r + (\varepsilon U_{\varphi\varphi})_{\varphi} / r^2 + \alpha^2 U_{\varphi\varphi} = 0 \quad (3)$$

Ценой, однако, появления в (3) слагаемого  $\alpha^2 U_{\text{фф}}$ . Назовём его «полевым эффектом» скрутки. Из анализа выражения (3) студенты ОТИ МИФИ [3] сделали вывод: **скрутка витой пары не влияет на её межпроводниковые ёмкостные и индуктивные параметры.**

Действительно, для осесимметричных структур (например, коаксиальных кабелей),  $U_{\text{фф}} = 0$  вместе с полевым эффектом. С другой стороны, пара круглых проводов (рис. 2 слева) – есть конформное отображение коаксиальной структуры [1]. Потому скрутка безразлична и для витой пары. На первый взгляд, это парадокс, так как влияние скрутки на параметры витой пары – факт общеизвестный. В том числе из опытов [4]. Тем не менее, парадокса здесь нет, так как у реальных конструкций нарушена осевая симметрия. В том числе эффектами скрутки. Так, к примеру, круглые в поперечном сечении проволоки превращаются в овальные (почти эллиптические: сечение А–А рис. 2). Осевую симметрию нарушает также изоляция проводов. Например, как показано в [1], дробно-линейное конформное отображение симметричной пары в коаксиальную ведёт к тому, что изоляция жил отображается в пару эксцентричных окружностей. Так что, если изолятор – не воздух, то налицо нарушение осевой симметрии. А в триадах в лучшем случае есть лишь ось симметрии третьего порядка.

Так что вывод молодых учёных правильный, но его практическая ценность в том, что он указывает на *малость* эффектов скрутки. И, что может быть ещё полезнее, если изолятор – воздух (вакуум), то он подтверждает применимость к витым парам взаимно-обратного отношения межпроводниковой ёмкости и индуктивности  $LC = 1/c^2$  [5]. Здесь  $c$  – скорость света вакууме.

### Эффект крутильной деформации.

Как указано в [2], сечение круглых жилы в скрученных сердечниках практически эллиптическое (с полуосями  $a : c = 1 : 1/\cos\beta$ ). Это – чисто геометрический эффект. Для выявления его роли «в чистом виде» вычислим ёмкость прямых эллиптических жил с изменяющимся отношением  $a : c$  (в воздухе). В ELCUT такая задача тривиальна. На рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе представлено изменение  $\Delta C = C(\beta) - C$  ёмкостей  $C_{01}$  и  $C_{12}$  триады при росте угла  $\beta$ .

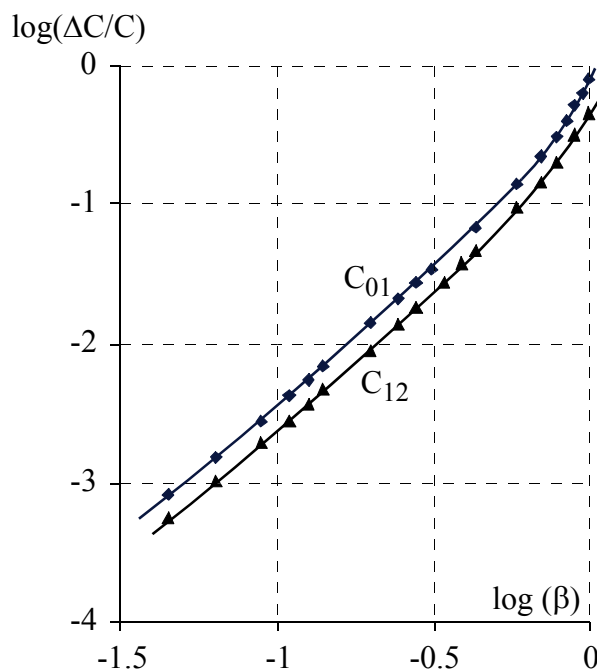


Рис. 3. Зависимость межпроводных ёмкостей  $C_{01}$  (экран-жила) и  $C_{12}$  (жила-жила) прямой триады.

Как видно, при  $\Delta C/C < 10\%$  расчёт практически не отличается от закона  $\beta^2$  (прямые). Но коэффициенты при  $\beta^2$  отличаются: **0.36** для  $C_{01}$ , **0.25** для  $C_{12}$ . И, как показано ниже, иногда даже отрицательные. Это – как пример того, что на каждый параметр поправочных коэффициентов не напасёшься, как это было уже сказано в [1].

**Примечание.** Здесь и далее индексы при ёмкостях – это номера проводников, (в скобках – закороченных между собой). Так,  $C_{01}$  – это ёмкость экран-провод, а, к примеру,  $C_{0(12)}$  – экран-два провода, соединённых между собой.

### «Полевой эффект» скрутки жил кабеля.

Действие полевого эффекта – слагаемого  $\alpha^2 U_{\phi\phi}$  – сложное, так как распределение  $U_{\phi\phi}$  достаточно причудливо. Как это видно на рис. 4, где представлена цветовая карта  $U_{\phi\phi}$  при расчёте ёмкости  $C_{01}$  триады и ёмкости  $C_{0(12)}$  симметричной пары. Тонкие чёрные линии – изопотенциалы. Цвет – величина  $U_{\phi\phi}$ . Помимо красоты, такие карты помогают разбивать межпроводниковое пространство на блоки с кусочно-постоянной плотностью объёмного заряда  $\rho$ , что необходимо для расчётов в среде ELCUT.

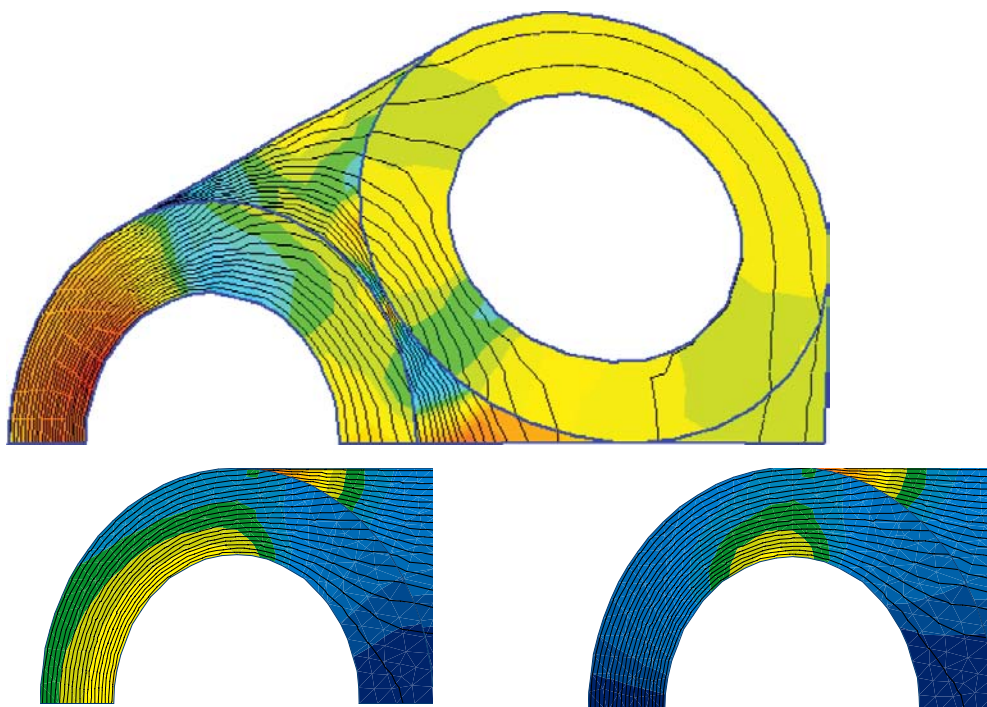


Рис. 4. Карта электрических полей в прямой триаде (вверху) и прямой витой паре (внизу) для расчёта полевого эффекта скрутки.

К слову, на этот пункт следует обратить особое внимание. Дело в том, что с точки зрения реализуемого в ELCUT метода конечных элементов, задачи (2') и (4) могут быть решены с любыми координатными распределениями  $\epsilon(\mathbf{r},\phi)$  и  $\rho(\mathbf{r},\phi)$ . Но нынешняя версия ELCUT умеет решать задачи лишь с кусочно-постоянными  $\epsilon$  и  $\rho$ . И для получения результатов с произвольными  $\epsilon(\mathbf{r},\phi)$  и  $\rho(\mathbf{r},\phi)$  приходится идти в обход.

Например, для (2') – путём последовательных приближений. Для чего переносим  $\alpha^2 U_{\phi\phi}$  в правую часть (3) и получаем уравнение Пуассона:

$$(\mathbf{r} \epsilon U_r)_r / r + (\epsilon U_\phi)_\phi / r^2 = -\rho / \epsilon_0 \quad (4)$$

где  $\rho(\mathbf{r},\phi) = \alpha^2 U_{\phi\phi} \epsilon_0$  – плотность (фиктивного) объёмного заряда. Она, однако, неизвестна. И потому для первого приближения берём  $\rho$ , пропорциональное  $U_{\phi\phi}$  из решения задачи (2).

А так как ELCUT не умеет решать задачи с функциями  $\rho(\mathbf{r},\varphi)$ , их аппроксимируем кусочно-постоянной функцией, усредняя  $\rho$  по интуитивно выбираемым блокам межпроводникового пространства:  $\langle\rho\rangle = -\int \epsilon_0 \alpha^2 U_{\varphi\varphi} \mathbf{r} d\mathbf{r} d\varphi$ . (На рис. 11 границы таких блоков обозначены синими линиями).

Полученные таким способом результаты весьма поучительны.

Табл. 1. Межпроводная ёмкость витых триад и пар.

| $\beta$              | ёмкости триады, нФ/км |            |            | ёмкости витой пары, нФ/км |            |               | без экрана |  |
|----------------------|-----------------------|------------|------------|---------------------------|------------|---------------|------------|--|
|                      | $C_{0(123)}$ %        | $C_{12}$ % | $C_{01}$ % | $C_{12}$ %                | $C_{01}$ % | $C_{0(12)}$ % | $C$ %      |  |
| $0^\circ$            | 144.2                 | 260.7      | 661.8      | 129.6                     | 233.9      | 427.0         | 60.8       |  |
| $33^\circ$           | 162.7 13              | 287.1 10   | 704.9 6    | 132.6 2                   | 233.4 -0.2 | 417.4 -2      | 71.1 17    |  |
| $\langle\rho\rangle$ | 161.5 -0.7            | 278.3 -3   | 719.6 2    | 131.4 -1                  | 230.8 -1   | 416.9 -0.1    | 71.4 0.3   |  |

В табл. 1 приведены значения трёх (основных) ёмкостей триады (изоляция ПХВ,  $\epsilon=3.5$ ), ёмкостей экранированной витой пары (полиэтилен,  $\epsilon=2.5$ ) и ёмкости уединённой витой пары (без экрана). Без скрутки ( $\beta=0$ ) и с учётом скрутки ( $\beta=33^\circ$ , шаг  $s \sim 8$  мм, диаметр жил 1 мм, с изоляцией 1.6 мм). В средней строке – изменение только за счёт «эффекта эллипсоида», а в нижней – полное, с учётом полевого эффекта скрутки.

Для наглядности в таблице приведены процентные изменения ёмкостей. Как видно, в целом, эффект скрутки нельзя назвать ни малым, ни предсказуемым. Скажем, скрутка вовсе не обязательно увеличивает межпроводниковую ёмкость. Например, ёмкости  $C_{01}$  и  $C_{0(12)}$  витой пары уменьшаются на 1-2 %, а другие – увеличиваются на 1 – 17 %.

И, что, видимо, вообще невозможно было предсказать: **экран витой пары почти полностью подавляет эффект её скрутки**: изменение ёмкости  $C_{12}$  падает от 17% до 1 %!

Это наблюдение показывает, что расчётным путём можно подобрать такие параметры витых пар, чтобы шаг их скрутки минимально влиял на ёмкости. И, следовательно, на важнейшие характеристики линий связи: волновые сопротивления и скорость сигнала. Это особенно полезно для кабелей с большим количеством витых пар, применяемых для параллельной передачи данных.

### Эффекты скрутки многопроводочных жил.

Скрутка жил меняет свойства проводников по ряду причин: изгиба, упруго-пластической деформации, деформационной анизотропии свойств проводов и изоляции, эффектов формовки и опрессовки жил.

Помимо этого, скрутка влияет на ёмкость жилы из-за усложнения рельефа поверхности, а также «эффекта разбухания», так как 6 проволок не могут уложиться вокруг периметра центральной с тем же диаметром (рис. 5 в центре). Это ведёт либо к выпиранию одной из проволок, либо вынуждает вдавливать её с помощью калибров, как упомянуто выше. Что ведёт к деформации проволок (рис. 5 справа). Но мы пока такими тонкостями пренебрежем, и будем работать со структурой, показанной на рис. 5 слева. Так как здесь это не имеет принципиального значения, зато резко упрощает работу с ELCUT.

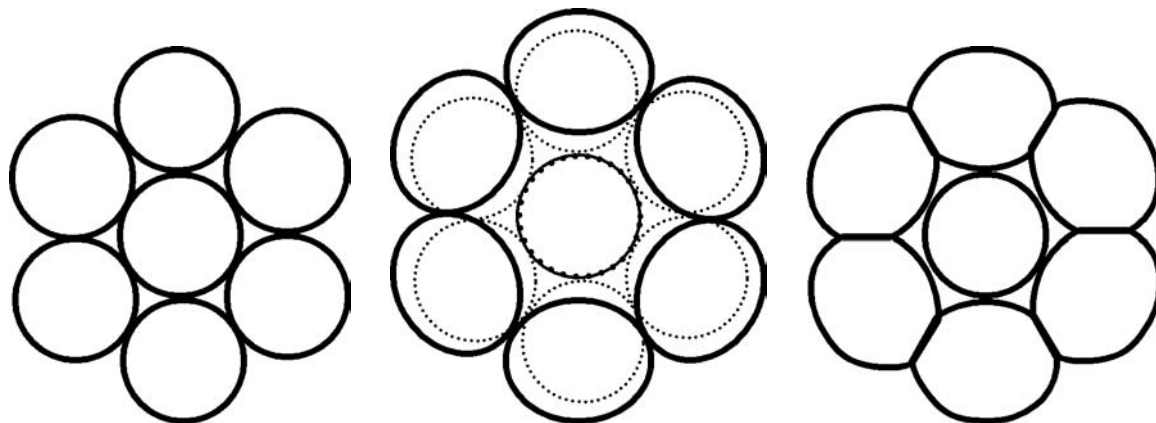


Рис.5 . Поперечное сечение прямой жилы (слева) со свободной симметричной скруткой (центр) и калиброванной (справа). Следует обратить внимание на эффект «разбухания» многопроволочных жил в результате скрутки относительно исходного состояния (центр, пунктир – левое сечение). А также на деформацию в результате калибровок (справа).

Под ёмкостью жилы будем подразумевать её ёмкость относительно экрана или соседней жилы. И работать с семипроволочной жилой, так как для неё эффекты максимальны.

К слову, работа калибров и обжимных роликов и валов, обеспечивающих требуемые форму, размеры и плотность кабельных жил, может быть эффективно моделирована в **ELCUT**, если его научить решать упруго-пластические задачи наподобие расчёта формы проволоки, раздавливаемой губками тисков.

В этом случае в кабельные расчёты могут быть включены расчётные формы проволок в жилах (наподобие изображённых на рис. 5 справа). А сам **ELCUT** эффективно использовать для широкого внедрения вычислительной технологии в кабельное дело. То есть численного моделирования всего технологического цикла: от волочения проволок, их скрутки и формовки жил и сердечников до выходного контроля параметров кабельной продукции. Пока такая технология известна лишь для особо сложных науко- и капиталоемких производств: ядерных, аэрокосмических, автостроительных... Но в кабельной индустрии отдача от неё может быть намного больше.

### **Зависимость ёмкости прямой семипроволочной жилы от радиуса экрана.**

Выше приведены результаты расчётов с однопроволочными жилами. Но значительную часть кабельной продукции собирают из жил, скрученных из 7, 19 или большего количества проволок (рис. 1).

Как указано выше, здесь могут быть существенны такие факторы:

- усложнённый рельеф поверхности жил,
- угол ориентации жилы относительно соседей и экрана,
- наличие винтовой симметрии,
- взаимодействие этих факторов друг с другом и со скруткой жил в сердечнике.

Далее мы рассмотрим лишь первые три фактора, выделив их в «чистом» виде. Оставив четвёртую проблему для отдельного обсуждения.

В данном разделе вычислим ёмкость не скрученной **семипроволочной** жилы в коаксиальном кабеле с радиусом экрана **b**. Изолятор – воздух. Пусть  $\varnothing$  – диаметр проволоки. Такая жила имеет два диаметра: максимальный  $2a = 3\varnothing$  и поменьше  $(1 + \sqrt{3})\varnothing$ . В среднем радиус жилы  $\langle a \rangle = \varnothing (1 + \sqrt{3}/4) = 0.955 a$ . Отметим, что диаметр сплошного круглого провода такого же сечения  $2.646 \varnothing = 1.764 a$  (радиус **0.882 a**).

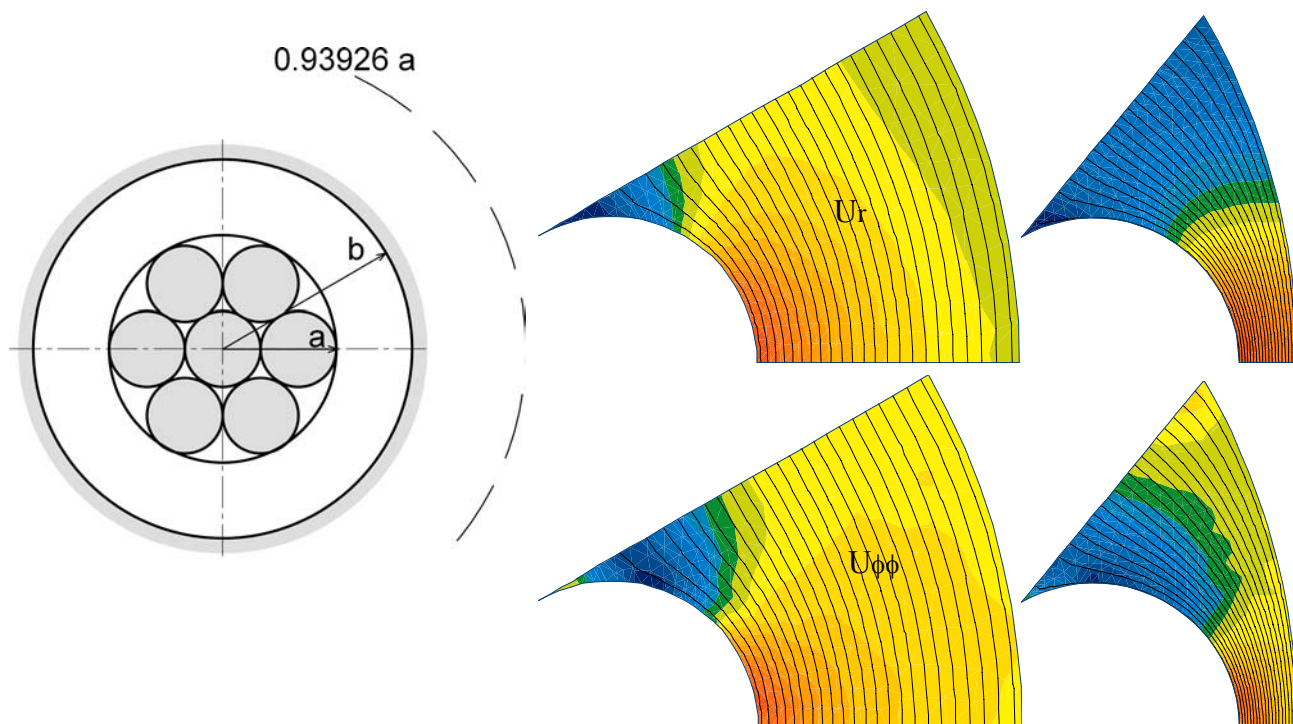


Рис. 6. Карта электрических полей в межпроводниковом пространстве коаксиального кабеля с семипроволочной жилой. Пунктиром обозначен «магический» радиус (см. текст). Справа – карта поля при малом зазоре жила-экран. Следует обратить внимание на сужение несущих заряды областей поверхностей экрана и жилы (их «выдаёт» красный ореол повышенных значений напряжённости электрического поля). А также на нулевое значение радиальной составляющей напряжённости  $U_r$  (голубой клин между проволоками) и не нулевое  $U_{\phi\phi}$  (зелёный клин).

Учитывая симметрию, вычисление достаточно произвести в секторе между векторами **a** и **b** на рис. 6. Справа представлена, полученная с помощью ELCUT картина распределения потенциала вокруг проволоки (тонкие черные линии). Цвет – величина радиальной производной потенциала  $U_r$ , а в зеркальном секторе –  $U_{\phi\phi}$ . Из рисунка видно, что искажения электрического поля существенны лишь на расстояниях порядка диаметра проволоки, что вполне согласуется с интуитивным представлением.

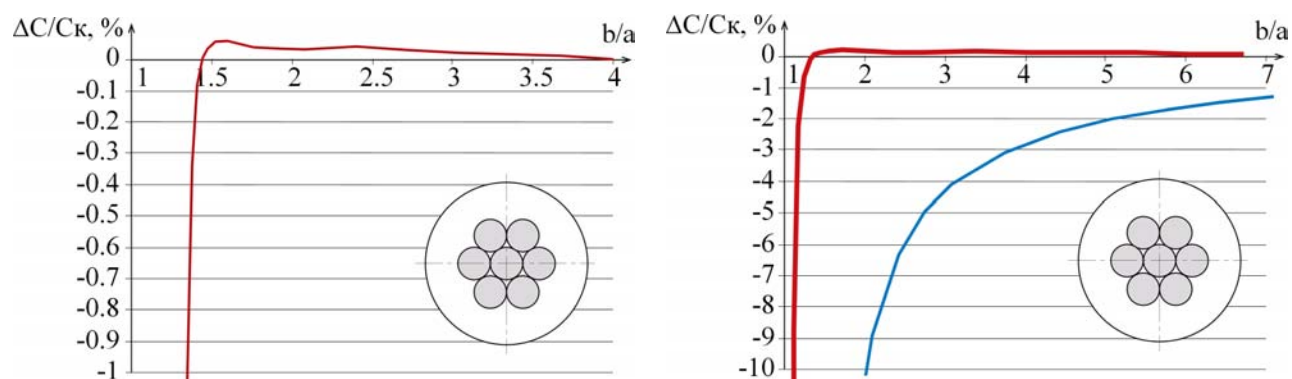


Рис. 7. Зависимость ёмкости от отношения радиусов экрана и семипроволочной жилы коаксиального кабеля. Справа – толстая линия, слева – она же подробнее. Тонкая нижняя линия правого рисунка – зависимость  $\Delta C/C$  для коаксиального кабеля с однопроволочной жилой того же диаметра, что многопроволочная.

На рис. 7 представлены графики зависимости величины  $\Delta C/C_k$  от параметра **b/a**, где  $\Delta C = C - C_k$ ,  $C$  – ёмкость семипроволочной жилы,  $C_k$  – коаксиального кабеля с круглой жилой «магического» радиуса  $a^* = 0.9393 a$  (пунктир на цветной карте рис. 6), который

обеспечивает глубокий минимум (0.03%) ошибки формулы (5) относительно расчёта ELCUT:

$$C_k = 2\pi\epsilon_0 / \ln(b/a^*) \quad (5)$$

Из графиков видно, что, строго говоря, формулу (5) нельзя применять для многопроволочной жилы. Но, если изоляция жилы толще  $\varnothing$  ( $b/a > 1.3$ ), то погрешность (5) меньше 0.1%. Отметим, что (5) очень чувствительна к отклонению радиуса от магического. Если, к примеру, отклонение всего 2 %, то ошибка возрастает на 1-2 порядка: до 1-7%.

Смысл «магического» радиуса может прояснить цветная часть рис. 6, где он как бы обозначает нижнюю границу несущей заряд поверхности проволок (красная область поля  $E = Ur$ ). По мере уменьшения радиуса экрана уменьшается и «рабочая поверхность» жилы (правая картинка). Одновременно выключается и поверхность экрана. Что, скорее всего, и ведёт к обвальному снижению ёмкости при  $b/a < 1.3$ .

Забегая вперёд, отметим, что «открытый» здесь «магический» радиус численно совпадает с эффективным радиусом индуктивного инварианта, о котором речь пойдёт в следующей статье.

### Зависимость ёмкости жилы от угла её ориентации.

Семипроволочные жилы имеют ось шестого порядка и их ёмкостные свойства зависят от угла поворота  $\delta$  (скажем, относительно экрана или соседней жилы). На рис. 8 справа представлен график зависимости  $\Delta C/C$  – изменения ёмкости  $C_{0(12)}$  (две жилы-экран).

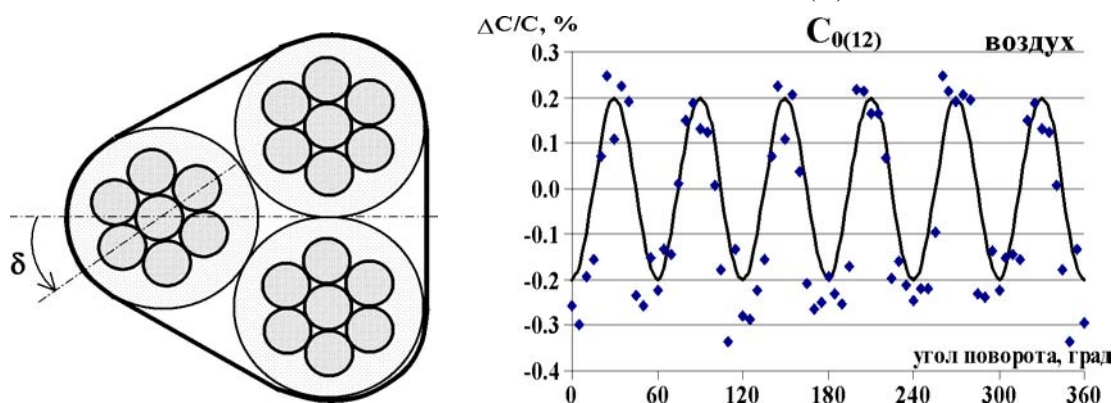


Рис. 8. Зависимость ёмкости экран-пара жил семипроволочной жилы от угла поворота жил относительно экрана. Точки – расчёт ELCUT. Кривая – линия регрессии (см. текст).

Здесь и далее полагали, что все участвующие жилы поворачиваются синфазно. Точки – расчёт, кривая – регрессия  $0.2\% \cos(6\delta)$  (период  $60^\circ$ ). Её амплитуда подобрана по минимуму квадрата отклонения (0.1%, обусловленного ошибками вычислений). Отметим попутно, что если жилы с изоляцией ПВХ, то амплитуда увеличивается до 0.55% с таким же разбросом.

Ещё больше изменение ёмкости неэкранированной пары жил 0.7 % (рис. 9, полиэтилен;  $\epsilon=2.5$ , размеры жил и изоляции, как у триады).

На первый взгляд, угловое изменение ёмкости жилы можно вообще игнорировать, так как в среднем оно равно нулю. Но, если жил несколько, то эффекты их скрутки вместе со скруткой сердечника могут привести к периодической неоднородности электрических свойств кабеля. Или малопонятным колебаниям свойств выпускаемой продукции. Так что в арсенале кабельного технолога должно быть средство расчёта таких эффектов.

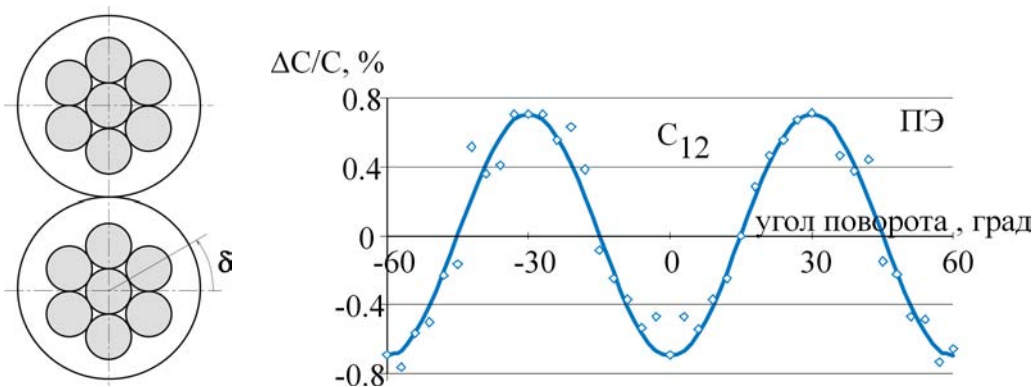


Рис. 9. Зависимость межпроводниковой ёмкости неэкранированной витой пары из многопроводочных жил. Точки – расчёт ELCUT. Кривая - линия регрессии (см. текст).

### Зависимость ёмкости жилы от скрутки её проводов.

Как указано выше, скрутка проявляется через два механизма:

- искажения формы поверхности проводников (этим пренебрегаем);
- появления в объёме изоляторов фиктивных зарядов  $\rho(\mathbf{r},\varphi) = -\epsilon_0 \alpha^2 U_{\varphi\varphi}$ .

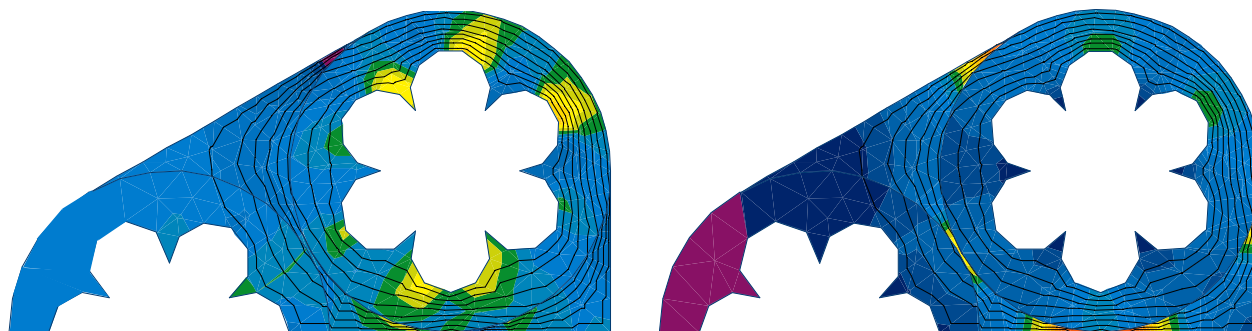


Рис. 10. Карта электрического поля триады с семипроволочными жилами. Слева – относительное распределение фиктивного объёмного заряда ( $U_{\varphi\varphi}$ ). Справа – напряжённости электрического поля  $E$ .

В левой части рис. 10 представлена цветовая карта распределения этих зарядов в триаде. Для упрощения рассуждений здесь и далее полагаем, что жилы между собой не скручены (эта скрутка рассмотрена выше).

Сразу отметим интересный и, отчасти даже парадоксальный факт: электрическое поле  $E$  между проволоками нулевое (синие клинья в правой части рисунка), а вот фиктивный заряд туда спокойно «затекает» (синие, зелёные, и жёлтые клинья в левой части рисунка).

Ещё контрастнее это явление в неэкранированной паре (рис. 11). В нижней части этого рисунка расположено дробно-линейное конформное отображение пары (инверсия с полюсом  $0,0$  – жирная чёрная точка).

Неэкранированная витая пара открыта в Космос, в то время как расчёты ELCUT могут быть толком проведены лишь в ограниченных областях. Указанное отображение преобразует поверхность левой жилы в экран наподобие звезды Давида, окружающей отображение этого Космоса, бесконечность которого стянута здесь к черной точке. Поверхность же правой жилы превращается в кружевную фигуру из дуг окружностей (справа – увеличенное изображение). И открытая задача превращается в закрытую. При этом, если левая жила поворачивается вокруг оси (полюса), то экран – тоже (возможно, в обратном направлении). Кстати, график на рис. 10 построен именно таким способом с помощью LabelMover – очень полезного инструмента ELCUT.

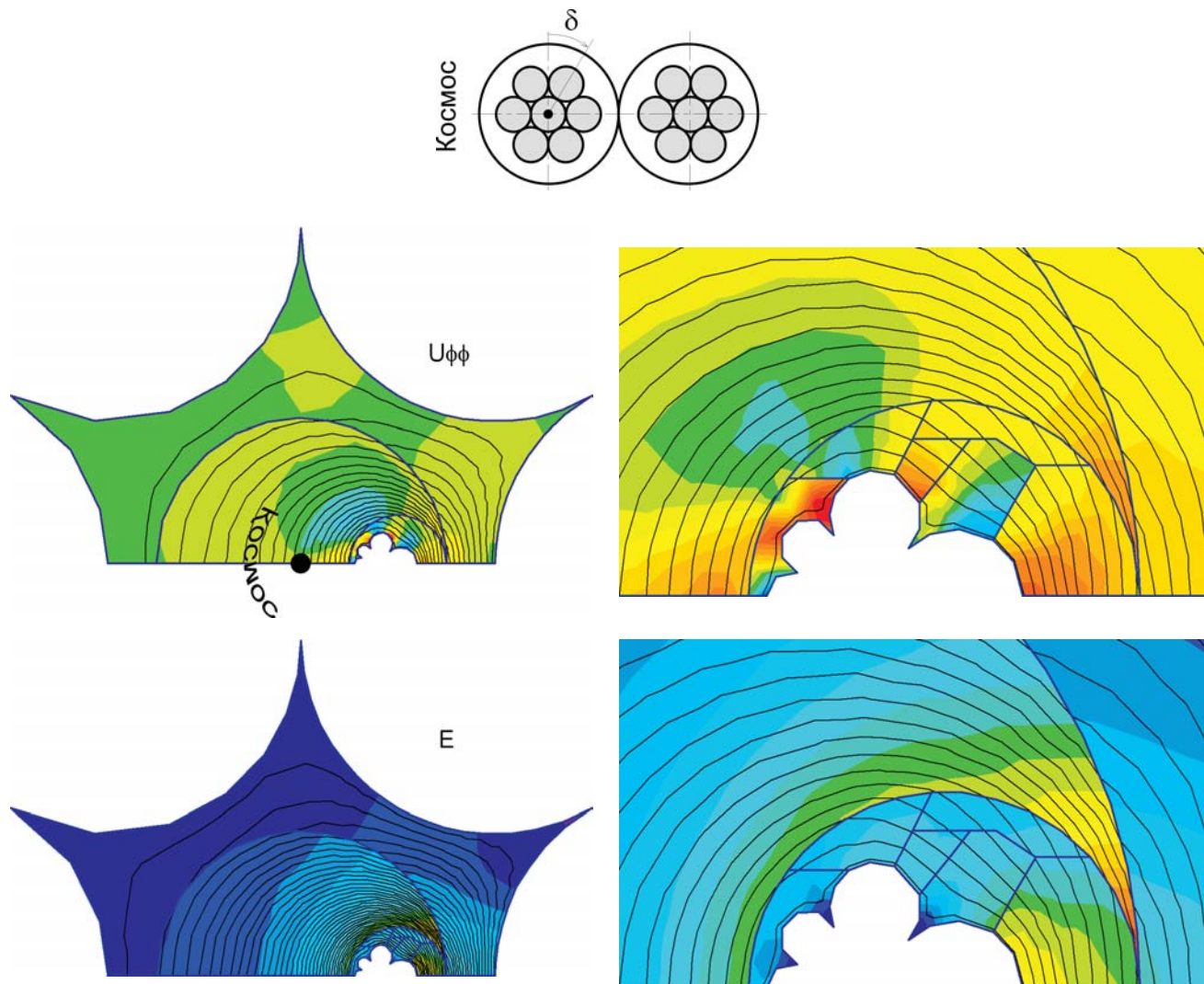


Рис. 11. Карта электрического поля в дробно-линейном конформном отображении витой пары. Малиновая точка – полюс функции, отображающей левую жилу в экран в виде «звезды Давида». Внутри экрана схематически показано конформное отображение надписи «Космос», справа – увеличенное отображение правой жилы в виде грозди окружностей. Оно окружено конформным отображением изоляции жилы, разделённым на блоки с постоянной объёмной плотностью фиктивного заряда (тонкие синие границы). Черные тонкие кривые – линии равного потенциала.

В табл. 2 приведены результаты расчёта ёмкости жил триады и пары без скрутки  $\beta = 0$  (прямая укладка проволок) и с углом скрутки  $\beta = 33^\circ$ . Как видно из таблицы, скрутка многопроволочных жил увеличивает их ёмкость на 1...5%.

Табл. 2. Влияние скрутки проволок на ёмкость жил.

|                    | триада   |          | симметричная пара |                    |
|--------------------|----------|----------|-------------------|--------------------|
|                    | $C_{03}$ | $C_{03}$ | $C_{12}$          | $C_{12}(30^\circ)$ |
| изолятор           | воздух   | ПХВ      | полиэтилен (ПЭ)   | полиэтилен (ПЭ)    |
| $\beta = 0$        | 116.7    | 351.2    | 53.57             | 53.28              |
| $\beta = 33^\circ$ | 122.5    | 354.5    | 55.13             | 53.96              |
| изменение          | 4.9%     | 0.9%     | 3.6%              | 1.3%               |

К сожалению, большая трудоёмкость вычислений в существующей версии ELCUT не позволяет произвести численные исследования зависимости от угла (шага) скрутки для всех интересных и практически важных случаев.

## Выводы.

1. Эффект влияния скрутки проволок на ёмкость жил не мал (изменение на  $-3... + 5\%$ ) и соизмерим с эффектом скрутки самих жил в сердечнике кабеля ( $1-17\%$  [1]).
2. Ёмкость жил заметно (до  $\sim 1\%$ ) зависит от угла их ориентации.
3. Если пренебречь эффектами скрутки, ёмкостные свойства многопроволочной жилы с высокой точностью можно моделировать с помощью однопроволочной жилы некоторого «магического» радиуса (для семипроволочной его величина составляет **0.939** от максимального радиуса жилы).
4. Для эффективного внедрения **ELCUT** в кабельные расчёты и вообще для создания числовой кабельной технологии эту программу необходимо научить решать:
  - упруго-пластические задачи по моделированию деформации проволок калибрами, а также в результате их изгиба в процессе скрутки;
  - уравнения Лапласа с координатно-зависимыми коэффициентами при производных, а уравнения Пуассона ещё и с координатно-зависимыми правыми частями, в том числе задаваемыми аналитическими и табличными способами.
5. Забегая вперёд, отметим, что для расчёта индуктивных и других параметров кабельной продукции **ELCUT** должен быть дополнительно снабжён:
  - функцией изменения и экспорта частоты в **Label Mover** для построения амплитудно-фазовых характеристик различных деталей кабельных конструкций в диапазоне от Герц до мега- и гига Герц;
  - вычислением вторых производных вектор-потенциала **A** в полевом калькуляторе задачи «магнитное поле переменных токов»;
  - функцией отображения частоты в этом калькуляторе;
  - калькулятором вторичных параметров линий: волнового сопротивления, волнового числа и затухания.

В целом исследования данной работы подтверждают основной тезис статьи [1] о том, что если необходим расчёт параметров кабельных конструкций с погрешностью меньше 10% и вообще с любой, наперёд заданной точностью, **то следует раз и навсегда отказаться от традиционно применяемых приближённых формул с нагромождением поправочных коэффициентов и моделировать электрические и магнитные поля из «первых принципов».**

В том числе, с использованием метода конечных элементов и вспомогательных приёмов, например, конформных отображений.

Так что, после надлежащей доработки, **ELCUT** может стать основным инструментом во всём кабельно-расчётном деле.

## Литература

1. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Расчёт межпроводной индуктивности и ёмкости симметричных прямых пар методами конформных отображений и конечных элементов. «Кабель» №3, 2007.
2. А.И.Листратенков. Теоретические основы конструирования силовых кабелей и проводов.–М: Полиграф сервис, 2006.
3. В. Н. Колышкин, А. С. Глазырин. Расчет первичных параметров витой пары. «Дни науки»-2003.-Озёрск: ОТИ МИФИ, 2003.
4. А.В. Аникин, А.В. Панов. Скорость сигнала в витых парах. «Дни науки»-2003.-Озёрск: ОТИ МИФИ, 2003.
5. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчёт электрической ёмкости.-Л.: Энергоиздат, 1981.