

Производство кабелей связи и конформные отображения

Вишняков Е.М., ОТИ МИФИ г. Озерск,
Хвостов Д.В., ЗАО «СИМПЭК», г. Москва

Недавно [1] исследователи Самарского государственного технического университета — СамГТУ сообщили о своем опыте применения конформных отображений для построения математической модели автоматической системы управления технологическими процессами — АСУТП в кабельном производстве. В частности, экструзионного нанесения изоляции на жилы витых пар.

В качестве целевой функции системы автоматического регулирования (САР) они использовали для емкости $C = \text{const}$. То есть такую настройку САР, при которой на выходе экструдера получается провод, емкость которого в витой паре постоянна (относительно другого, такого же). А в качестве параметра регулирования — толщину t слоя изоляции. Или диаметр $2b$ провода в изоляции при стабильном диаметре жил $2a$.

Необходимость разработки специальной модели самарские исследователи мотивировали тем, что изоляция

проводов в витых парах и кабелях на их основе неоднородна из-за наличия обширных воздушных пустот между ними (рис.1). В результате чего неизвестна величина эффективной диэлектрической постоянной ϵ^* в примененной ими формуле для расчета емкости пар:

$$C = \pi \epsilon^* \epsilon_0 / \ln[b/a + (b^2/a^2 - 1)^{1/2}].$$

Чтобы получить эту формулу, а также вычислить ϵ^* они и использовали аппарат конформных отображений. А именно — дробно-линейную функцию:

$$w = w_0 + M/(z - P),$$

где P — полюс, M — масштаб, w_0 — некоторый сдвиг координат в плоскости u, v . (несколько ранее в [2] ее применили для расчета первичных параметров линий связи).

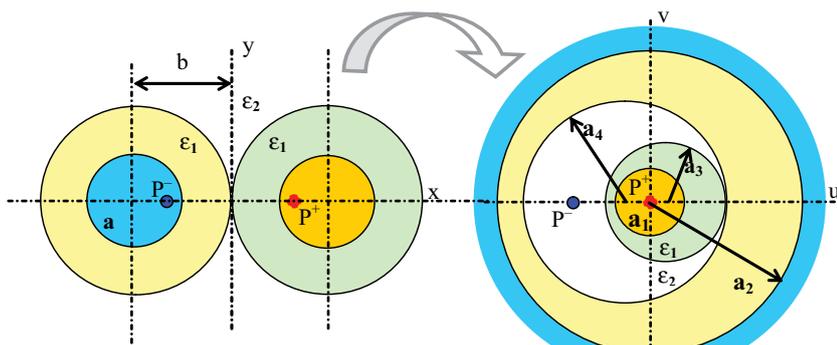
Ценное свойство такой функции в том, что она отображает окружности и прямые, находящиеся в плоскости $z = x + jy$, в окружности (возможно, с другим радиусом и центром) и/или прямые в плоскости $w = u + jv$. И наоборот. Если, к примеру, полюс P разместить в одну из точек:

$$P^\pm = \pm(b^2 - a^2)^{1/2},$$

то оригинал — симметричная пара круглых жил — отображается в коаксиальную структуру. В ней жила, где размещен полюс, «разворачивается» в экран, простирающийся в бесконечность, а соседняя жила перемещается в центр коаксиальной структуры (рис. 1). При этом радиусы жил оригинала отображаются в «коаксиальные» радиусы

$$a_4 = M/(a - P^+) \quad \text{и} \quad a_1 = M/(a - P^-).$$

Рис.1. Отображение прямой незэкранированной пары жил (голубой и оранжевый круги) в плоскости x, y в структуру, близкую к коаксиальной в плоскости u, v . Следует обратить внимание, что отображение границ изоляторов — две касающиеся и эксцентричные окружности



Общее свойство конформных отображений в том, что емкость

$$C = 2\pi\epsilon^*\epsilon_0/\ln(a_2/a_1)$$

коаксиальной структуры с диэлектрической постоянной изолятора ϵ^* совпадает с емкостью всех ее оригиналов. В том числе и с емкостью симметричной пары:

$$C = \pi\epsilon^*\epsilon_0/\ln \quad (1)$$

где $\ln = \ln(a_2/a_1)/2 = \ln[b/a + (b_2/a_2 - 1)^{1/2}]$.

Аналогично можно получить ее межпроводную индуктивность:

$$L = \ln \mu^*\mu_0/\pi \quad (2)$$

Эти формулы известны давно [3,4]. Но они пригодны лишь для однородных изоляторов: $\epsilon^* = \epsilon_1 = \epsilon_2$, $\mu^* = \mu_1 = \mu_2$. Что, как сказано выше, не характерно для витых пар в кабелях связи, окруженных воздушным изолятором ($\epsilon_2 = 1$), а также другими деталями конструкции: оболочкой, экраном, а в многопарных кабелях связи — изоляторами и жилами соседних пар (на рис.1 не показаны).

Так что величину ϵ^* в формуле (1) надо еще определить (чего обычно не требуется для μ , так как в большинстве кабельных конструкций $\mu^* = \mu_1 = \mu_2 \approx 1$).

С этой целью самарские исследователи разместили полюс P в точке касания изоляторов (рис. 2). Смысл в том, что границы изоляторов в этом случае отображаются в две параллельные прямые, разделенные зазором $b' = M/b$. А жилы — в симметричную же пару, заглубленную в изоляторы на величину $t' = M(b-a)/(b+a)$.

Но так как простые способы расчета такой емкости неизвестны, в [1] вместо нее использовали *приближенную* модель, в которой жилы заменили проводящими полуплоскостями (рис. 3).

Рис.2. Отображение круглых границ изоляторов в параллельные прямые

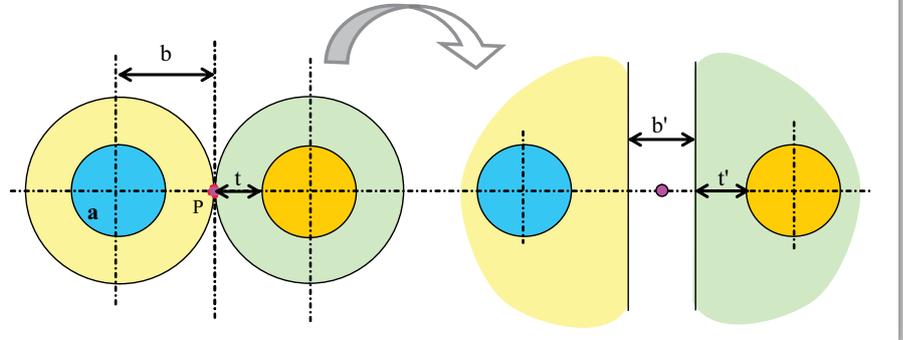
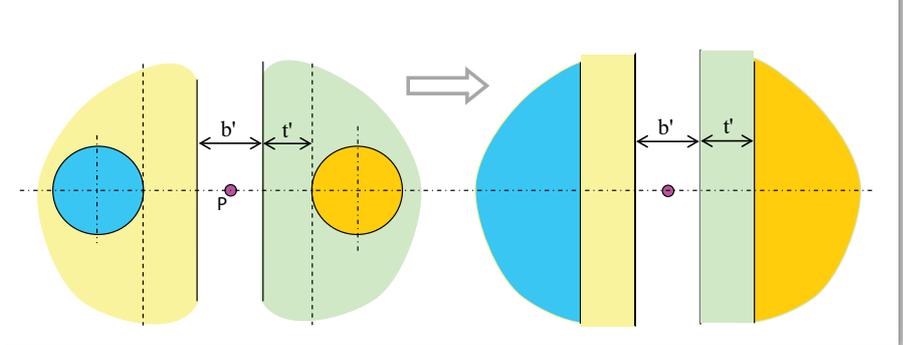


Рис.3. Замена круглых жил проводящими полуплоскостями



В результате получился бесконечный плоский конденсатор со слоистой изоляцией. Для которого нетрудно вычислить эффективную диэлектрическую постоянную:

$$\epsilon^* = (b' + 2t')/(t'/2\epsilon_1 + b'/\epsilon_2) = 2b'/[(b-a)/\epsilon_1 + (b+a)/\epsilon_2] \quad (3)$$

Фактически здесь использовали давно и широко применяемый в кабельных расчетах принцип: *ищем не там, где потеряли, а там, где светло*. И ниже увидим, что находим. Во избежание недоразумений, отметим, что в [1] приведены намного более громоздкие формулы. Так как там рассмотрели пары с разным диаметром жил, толщиной и материалом изоляции. Но для симметричной пары эти формулы вырождаются в (3).

Целью же нашей работы является исследование погрешности пред-

ложенного в СамГТУ приближения в форме (3). То есть, для практически наиболее важного случая. И к каким возможным последствиям может привести ее применение в АСУ.

Анализ ошибок приближенных вычислений емкости

Чтобы выявить эти ошибки, ϵ^* вычисляли с помощью приближенных формул и сравнивали с точными, полученными из «первых принципов» — методом конечных элементов в программной среде ELCUT (погрешность вычислений не больше 0,003%). Геометрию проводников и изоляторов приняли близкой к применяемой в LAN-кабелях ($a = 0,25$ мм и $t = 0,25$ мм).

Замена круглых жил проводящими полуплоскостями — весьма грубая модель. Тем не менее, если взглянуть на полученное в ELCUT электрическое

КАБЕЛИ СВЯЗИ

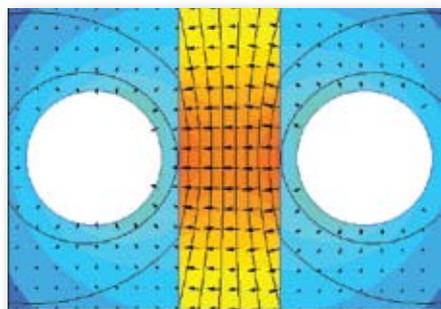


Рис. 4. Рельеф электрического потенциала (черные линии) и цветовая карта напряженности E (теплые тона — повышенная) в конформном отображении симметричной пары с плоскими границами изоляторов (ПВХ, $\epsilon = 3.5$). Стрелки — векторы E. Следует обратить внимание на повышенную однородность электрического поля в зазоре между изоляторами.

поле симметричной пары (рис. 4), то можно увидеть, что оно сосредоточено между жилами и похоже на однородное. Что вроде бы и придает модели некоторую разумность.

Результаты вычислений сведены в табл.1. В левой колонке приведена диэлектрическая постоянная изоляции пар ϵ_1 , рядом — их емкость C и эффективная диэлектрическая постоянная:

$$\epsilon^* = C/C_0$$

где C_0 — емкость для $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$.

В средних колонках ϵ^* получена с помощью (3) и методом взвешенного объемного усреднения, который рекомендуют практически во всех учебниках, справочниках и монографиях. Например, в [5]:

$$\epsilon^* = (\epsilon_1 S_1 + \epsilon_2 S_2) / (S_1 + S_2), \quad (4)$$

где S_1 и S_2 — сечения изоляторов с постоянными ϵ_1 и ϵ_2 соответственно.

Что, вообще говоря, представляет весьма странным, так как несостоятельность (4) может быть установлена простейшими средствами [6]. И ошиб-

ки ϵ^* могут достигать сотен процентов. На недопустимость применения (4) особо указывают и авторы [1]. Потому и обратились к конформному моделированию.

Сильные переоценки ϵ^* в объемном усреднении и, следовательно, расчетных емкостей, связаны с переоценкой роли частей изолятора, удаленных от проводников. Отметим попутно, что формальное применение (4) к оригиналу вообще ведет к абсурду: $\epsilon^* \rightarrow \epsilon_2 = 1$, так как объем воздушной массы $S_2 \rightarrow \infty$.

Как видно из табл.1, ошибка приближения, предложенного в [4], того же порядка. Только другого знака. Действительно, для полиэтилена ($\epsilon = 2,4$) она составляет -32% , а для ПВХ ($\epsilon = 3...5$) от -39% до -53% . Это **двукратный** промах в величине ϵ^* .

Такова цена замены круглых жил плоскими, которая ведет к резкому уменьшению действующего объема изолятора и, стало быть, к сильной недооценке его роли в формировании емкости. Что делает указанное приближение столь же неприемлемым, каким является и традиционное объемное усреднение.

Впрочем, если идею самарских исследователей применить к коакси-

альному отображению, то результат можно улучшить. Как видно на рис. 5, в узком секторе $\varphi, \varphi+d\varphi$ радиус-векторы границ изоляторов $r_3(\varphi)$ и $r_2(\varphi)$ почти неизменны. Если пренебречь тем, что сектор пересекает эти границы, а также линии изопотенциала не везде под прямым углом, то, следуя методике [3] нетрудно вычислить емкость сектора dC :

$$dC = 1/(1/dC_1 + 1/dC_2 + 1/dC_3),$$

где $dC_3 = d\varphi \epsilon_1 \epsilon_0 / \ln[a_4/r_3(\varphi)]$, $dC_2 = d\varphi \epsilon_2 \epsilon_0 / \ln[r_3(\varphi)/r_2(\varphi)]$, $dC_1 = d\varphi \epsilon_1 \epsilon_0 / \ln[r_2(\varphi)/a_1]$ — включенные последовательно составляющие элемента емкости dC . Полная емкость $C = \int_0^{2\pi} dC$. Учитывая, что $C = 2\pi \epsilon^* \epsilon_0 / \ln(a_4/a_1)$, в результате получим:

$$\epsilon^* = \int_0^{2\pi} \ln(a_4/a_1) / [\ln[a_4/r_3(\varphi)]/\epsilon_1 + \ln[r_3(\varphi)/r_2(\varphi)]/\epsilon_2 + \ln[r_2(\varphi)/a_1]/\epsilon_1] d\varphi / 2\pi.$$

Интеграл возьмем численно, и назовем такой прием радиальным усреднением. Как видно из табл. 1, его ошибка не превышает несколько процентов. А так как в применяемой модели межпроводную индуктивность пары (2) и вклад ее проводников [4]

Табл.1. Вычисление эффективной диэлектрической постоянной симметричной пары

| ELCUT | | | СамГТУ (2) | | Объемн. усредн. (4) | | Радиал. усредн. (5) | |
|--------------|------|--------------|--------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|
| ϵ_1 | C | ϵ^* | ϵ^* | ошибка | ϵ^* | ошибка | ϵ^* | ошибка |
| 1 | 21.1 | 1.00 | 1.00 | 0 % | 1.00 | 0 % | 1.00 | 0.0 % |
| 1.5 | 27.2 | 1.29 | 1.09 | -16 % | 1.41 | 9 % | 1.30 | 0.4 % |
| 1.8 | 30.5 | 1.45 | 1.13 | -22 % | 1.65 | 14 % | 1.45 | 0.0 % |
| 2 | 32.5 | 1.54 | 1.14 | -26 % | 1.81 | 18 % | 1.54 | -0.3 % |
| 2.4 | 36.3 | 1.72 | 1.17 | -32 % | 2.14 | 24 % | 1.71 | -0.9 % |
| 3 | 41.5 | 1.97 | 1.20 | -39 % | 2.62 | 33 % | 1.93 | -2.0 % |
| 3.5 | 45.5 | 2.16 | 1.22 | -44 % | 3.03 | 40 % | 2.10 | -2.9 % |
| 4 | 49.2 | 2.34 | 1.23 | -47 % | 3.43 | 47 % | 2.25 | -3.7 % |
| 4.5 | 52.8 | 2.50 | 1.24 | -50 % | 3.84 | 53 % | 2.39 | -4.6 % |
| 5 | 56.2 | 2.67 | 1.25 | -53 % | 4.24 | 59 % | 2.52 | -5.4 % |
| 5.5 | 59.5 | 2.82 | 1.255 | -56 % | 4.65 | 65 % | 2.65 | -6.2 % |
| 6 | 62.7 | 2.97 | 1.26 | -58 % | 5.06 | 70 % | 2.77 | -7.0 % |

можно вычислить точно, то вроде бы можно надеяться, что ошибки вторичных параметров: волнового сопротивления $Z = (L/C)^{1/2}$ и скорости сигнала $V = 1/(L/C)^{1/2}$ окажутся еще в пару раз меньше.

Общая задача кабельных вычислений

И все же в целом ситуация совсем не радужная. Дело в том, что в кабелях связи практически не применяют уединенные симметричные прямые провода. Их скручивают в пары, а также в пучки, зачастую оборудуя все это экранами, дренажами и корделями. А, как показали предыдущие исследования [7,8], неучет скрутки ведет к дополнительной ошибке порядка нескольких процентов. Еще больше дополнительная ошибка (до 10...30%) возникает из-за не учета роли соседних проводников (пар, экранов, дренажей).

Но даже и это — не главная беда. Дело в том, что кабельным технологам и расчетчикам приходится в основном решать не прямые кабельные задачи (заданы размеры и материалы кабеля — вычислить его первичные и вторичные параметры), а как раз обратные. Скажем, по заданному волновому сопротивлению Z рассчитать толщину t изоляции жил. И тут, как показывают численные эксперименты, погрешность в расчете первичных параметров ведет к усиленному (с фактором ~3) промаху в оценке t .

Это связано с тем, что величина первичных и вторичных параметров линий связи не сильно зависят от конструкции кабеля. И это, вообще говоря, удачное для производства свойство кабелей ведет к тому, что даже небольшие расчетные ошибки обесценивают любые приближения. Даже такие, казалось бы, неплохие, как радиальное усреднение.

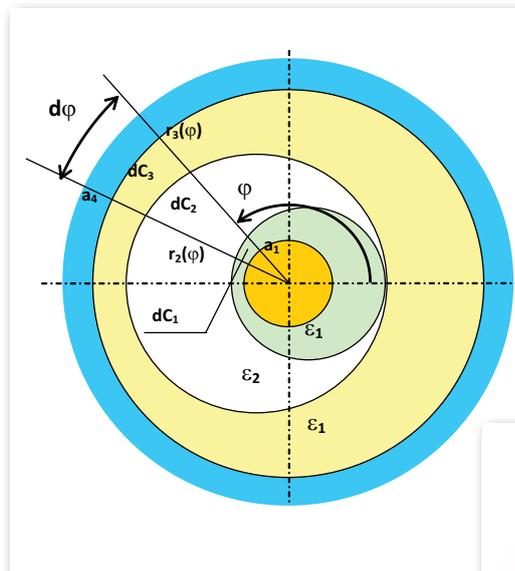
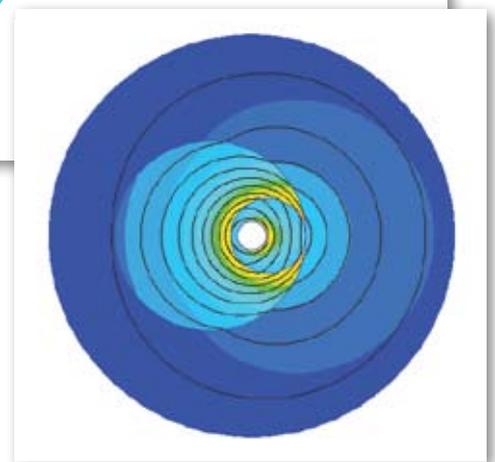


Рис. 5. К расчету эффективной диэлектрической постоянной с помощью радиального усреднения (масштабы условные).

Внизу — рельеф электрического потенциала (черные линии) и цветовая карта напряженности поля в конформном отображении пары (изолятор: $\epsilon = 6$, $t = a = 0,25$ мм).



Ошибки приближенных вычислений технологических параметров

Покажем это на конкретном численном примере.

Пусть надо изготовить пару с номиналом волнового сопротивления $Z_0 = 100$ Ом из медных проволок 0,5 мм с изоляцией ПВХ ($\epsilon = 3 \pm 0.5$). И пусть конструкция кабеля и его рабочая частота в целом таковы, что формулы (1) и (2) — «правильные».

(Заметим в скобках, что, как показали расчеты в ELCUT, некоторые кабельные конструкции обладают таким свойством: в них ошибки, возникающие из-за неучета разных деталей, компенсируют друг друга. Так что для них в (1) вместо ϵ^ следует просто подставлять ϵ . Но это, подчеркиваем, лишь для определенных конструкций, величин ϵ и в достаточно узком диапазоне частот).*

В этом удачном случае технолог легко может вычислить номинал толщины изоляции:

$$t_0/a = ch(Z_0 (K\epsilon)^{1/2} \pi \ln / Zv) - 1 \quad (5)$$

где $Zv = (\epsilon_0/\mu_0)^{1/2} = 376,76$ Ом — волновое сопротивление вакуума, K — фактор, учитывающий ошибку в определении ϵ .

Она может возникать как из-за колебаний свойств ПВХ ($\pm 14\%$), так и занижения на $-3...-10\%$ ($K = 0,97...0,9$) вследствие радиального усреднения, на -44% ($K = 0,56$) из-за приближения (4) и завышения на $+40\%$ ($K = 1,4$) в объемном усреднении (3). Пусть, однако, ошибок нет, тогда $K = 1$ и $t = t_0 = 0,37$ мм (полный диаметр жилы в изоляции 1,24 мм). Но если $K \neq 1$, то возникают (систематические) ошибки в определении толщины изоляции. Оценки этих ошибок из-за разных причин в процентах от номинала t_0 сведены в табл. 2.

Верхняя строка ($K = 1$) показывает масштаб колебаний t , необходимых для компенсации колебаний ϵ изоляции. Например, при уменьшении ϵ от 3,5 до 3 (-14%) для компенсации возникающего уменьшения емкости C (-14%) и, следовательно, подъема Z ($+7\%$) надо уменьшить толщину изоляции на 17%. Но еще раз подчеркиваем, что такое

КАБЕЛИ СВЯЗИ

сравнительно мягкое, без потерь выходного продукта, управление технологическими процессами возможно лишь в том счастливом случае, когда расчетная модель (1, 2) адекватна.

А теперь представим себе, что мы этого не знаем и ее «улучшаем». Скажем, с помощью радиального усреднения. Тогда мы фактически вводим в (5) «поправочный» коэффициент $K = 0,97...0,9$. То есть, ошибку. И, как видим из таблицы, это эквивалентно вводу в технологию сильной (от -7% до -22%) тенденции к систематическому занижению толщины изоляции, против которой придется упорно бороться. И уж совсем катастрофической выглядит ситуация, если попытаться «улучшить» управление процессами с помощью объемного усреднения или приближения, предложенного в СамГТУ. Тут возможен **двух-трехкратный** промах в толщине изоляции!

Задача управления производством

Ну и что? Кабельщики пользовались такими приближениями более полувека. А производственная практика, как известно, есть критерий истины. И в общем плане это верно. Но в кабельной отрасли есть особенность. Когда молодой инженер-кабельщик, вооруженный изложенной в учебниках и методических указаниях методикой расчетов, приходит на завод, то встречает там Старого Мастера. У которого за плечами тысячи и тысячи километров кабелей, а также вековой опыт его предшественников. И он знает, как их делать. Во всяком случае, он не допустит внезапную перенастройку экструдера на трехкратное уменьшение толщины изоляции. Он скажет: «Ребята, здесь что-то не так. Убавьте-ка толщину процентов на 15».

К сожалению, пока эти его знания не поддаются формализации (иначе

Табл. 2. Ошибки толщины изоляции

| ϵ | 3 | 3,5 | 4 |
|------------------------------|------|------|--------|
| K | | | |
| 1 | -17% | 0 | +17.5% |
| <i>Радиальное усреднение</i> | | | |
| 0,97 | -22% | -7% | +9% |
| 0,9 | -35% | -22% | -9% |
| <i>Объемное усреднение</i> | | | |
| 1,40 | 92% | 136% | 184% |
| <i>Приближение СамГТУ</i> | | | |
| 0,56 | -77% | -73% | -68% |

бы вошли в учебники и методики). Но с течением времени они все-же передаются молодому поколению кабельщиков.

Сейчас, однако, ситуация существенно иная. С одной стороны, происходит разрыв поколений: мастера уходят в силу естественных причин, а молодежь на замену не спешит. С другой стороны, ужесточаются требования к качеству кабельных изделий как по традиционным параметрам и полосе частот, так и к специальным свойствам: огнестойкости, дымовыделению, искро-, пожаро- и взрывобезопасности. Не говоря уже о цене.

А с третьей, на повестке дня стоит вопрос об организации АСУТП. А автомату все-равно, какую в него заложили модель кабельного изделия. Он — не Мастер, и, в случае чего, перестроит всю технологическую цепочку и задаст любые доступные ей технологические режимы. К примеру, исследователи СамГТУ предложили внедрить в АСУТП разработанную ими модель оценки ϵ^* . И даже сформулировали закон управления величиной толщины изоляции для целевой функции $C = \text{const}$.

Заметим, однако, что чаще реализует другую целевую функцию:

$Z_0 = \text{const}$. А параметры C и L и ряд других, как правило, факультативны или ограничены верхними и нижними уставками. К примеру, в стандартах [9,10] $Z_0 = 100 \pm 15$ Ом (31,25 КГц), $45 < C < 150$ нФ/км, $L < 1$ мГн/км, затухание < 3 дБ/км (39 КГц). Так что ограничиться регулированием одного параметра C , как правило, нельзя. Кроме того, как показывает табл. 2, в законе управления, основанном на приближении (2), может быть заложена значительная систематическая ошибка.

Модель САР процесса экструзионного нанесения изоляции

Посмотрим, к каким последствиям это может привести в производстве. Для чего исследуем численную модель САР для целевой функции $Z_0 = 100 \pm 15$ Ом (рис. 6). Она состоит из цепочки звеньев: СУ — системы управления, преобразующей сигнал ошибки x выходного параметра в сигнал управления u , K — усилителя мощности этого сигнала, H — исполнительного устройства (скажем, нагревателя экструдера для наложения ПВХ изоляции на жилу), СК — системы контроля волнового сопротивления Z и узла сравнения его с заданным Z_0 , замыкающего цепь отрицательной обратной связи САР.

Сразу отметим, что реальная САР куда сложнее, так как типичный экструдер содержит до полдюжины нагревателей [11]. Кроме того, толщина изоляции зависит еще и от скорости движения жилы, скорости вращения червяка рабочего цилиндра, геометрии дорна, матрицы и других деталей головки экструдера, способа охлаждения изоляции жилы на выходе аппарата...

Однако, для качественных исследований достаточно учесть какую-то зависимость толщины t изоляции от температуры T пластика. Скажем, линейную:

$$t = t_0 + k_T (T - T_0). \quad (6)$$

где T_0 — некий номинал температуры, обеспечивающий номинал толщины t_0 , k_T — коэффициент.

Учитывая инерционность нагревателей, передаточную функцию звена H определим с помощью дифференциального уравнения:

$$dT/dt = P/Q - T/\tau$$

где P — мощность нагревателя, Q — теплоемкость (например, головки экструдера), τ — характерное время ее остывания.

Контроль Z проще всего реализовать, как предложено в [1], то есть с помощью контроля C и диаметра жилы в изоляции $2b = 2(a + t)$:

$$\varepsilon = C \ln / \varepsilon_0$$

$$Z = (C/L)^{1/2} = Zv \ln [b_0/a + (b_0^2/a^2 - 1)^{1/2}] / \pi \varepsilon^{1/2} \quad (7)$$

Отсюда получим такое выражение для ошибки САР:

$$x = Z_0 - Z = Zv \ln [(b_0/a + (b_0^2/a^2 - 1)^{1/2}) / (b/a + (b^2/a^2 - 1)^{1/2})] / \pi \varepsilon^{1/2},$$

где $b_0 = a + t_0$. И такой закон управления (выходной сигнал СУ):

$$y/a = (Y + 1/Y)/2 - 1,$$

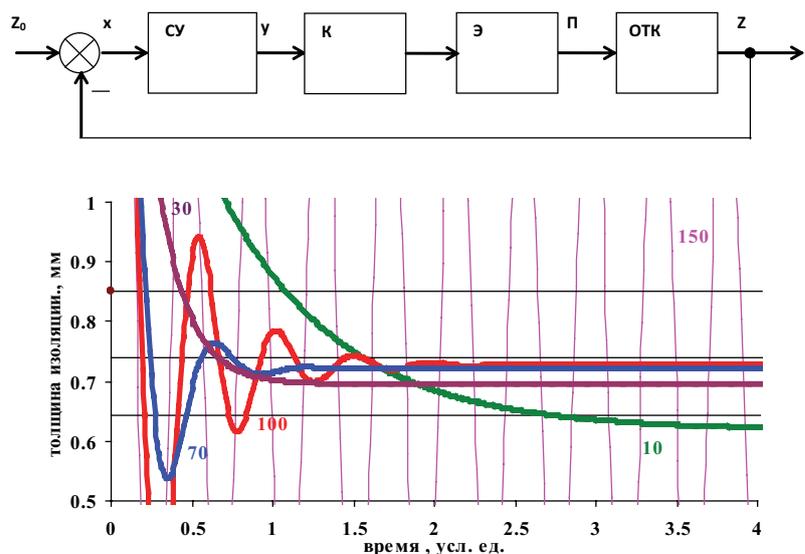
где $Y = E / \ln [(b_0/a + (b_0^2/a^2 - 1)^{1/2})]$, $E = \exp(\chi \pi \varepsilon^{1/2} / Zv)$.

Умножая y на коэффициент передачи усилителя K , получим мощность нагревателя

$$P = Ky.$$

Кроме этого, в модели учли запаздывание сигнала управления. Поскольку контроль C и $2b$ производят не на

Рис. 6. Структурная схема АСУТП. Z_0 — целевая функция, СУ — система управления, преобразующая ошибку $x = Z_0 - Z$ параметра в y — сигнал управления. K — усилитель, Э — исполнительный механизм, П — продукт, ОТК — контроль Z — выходного параметра продукта. Внизу — переходные процессы (процессы отработки начальной ошибки выходного параметра продукта) при различных коэффициентах усиления (числа около кривых). Горизонтальная линия — номинал толщины, пунктиры — допуск $\pm 15\%$. Следует обратить внимание на увеличение точности работы АСУТП по мере роста K и ухудшение устойчивости переходного процесса.



выходе экструдера, а после остывания изоляции жилы.

Итак, мы определили передаточные функции всех звеньев САР. Тут следует особо отметить, что передаточная функция y/x основного звена — СУ — не линейная. В отличие от линеаризованного закона управления в [1]. Это связано с тем, что линеаризация передаточных функций САР уместна при не слишком больших ошибках x . И ее традиционно используют в теории автоматического управления, так как это резко упрощает анализ работы САР. Но, как показывает табл. 2, ошибки могут быть настолько большими, что линеаризация тут не применима.

Впрочем, при работе с численной моделью нет необходимости в каких-либо упрощениях (кроме закона (6), который использовали просто потому, что имеем дело с неким абстрактным процессом экструзии).

На рис. 6 представлены переходные характеристики САР с первоначальной (ошибочной) настройкой $t_{\text{н}} = 2t_0$ (отметим, что для целевой функции $C = \text{const}$ статическая ошибка может быть еще раза в полтора больше). По сути, это изменение толщины изоляции во времени в процессе отработки начальной ошибки. При разной величине коэффициента усиления K .

Как видно, при не слишком больших K переходные характеристики выходят на горизонтали, параллельные номиналу t_0 . Но с большой остаточной ошибкой x . Ее называют статической ошибкой САР. А сами такие САР называют статическими. Ошибка САР неустранима в том смысле, что необходима для ее работы (а именно: для формирования сигнала управления, так как при $x = 0$, $y = 0$ и $P = 0$). Но x уменьшается с ростом K : $x \sim 1/K$. Например, при $K = 10$ ошибка слишком велика, и САР не справляется с задачей: Z уходит под нижнюю грани-

КАБЕЛИ СВЯЗИ

цу допуска. Увеличение K , скажем, до 30 выправляет ситуацию. И вообще, с его ростом растет и точность САР. Но растет и ее неустойчивость. Сначала в форме «звона» в начале процесса ($K = 70, 100$), а потом ($K \geq 150$) — не затухающих колебаний толщины с максимально доступной для механизмов САР амплитудой.

Отметим попутно, что такое поведение САР вполне типично. И, к слову, для подавления «звона» в цепь САР обычно включают специально настраиваемые пропорциональные интегро-дифференциальные — ПИД-регуляторы, которые позволяют не только увеличить K и снизить статическую ошибку САР, но и полностью ее подавить. Такие САР называют астатическими. Такое их свойство связано с тем, что их СУ реагирует не столько на ошибку x , сколько на скорость ее изменения dx/dt . И тогда сигнал управления $u \neq 0$, даже если $x = 0$. Численно моделировать работу ПИД-регуляторов не представляет особого труда.

Если же, как показано на рис. 6, регулирование приводит к тому, что толщина t выходит за рамки допуска (на рисунке — горизонтальные пунктиры), то указанные части продукта — брак. Так что, помимо прочего, рисунок показывает, насколько важна правильная начальная настройка экструдера. То есть попадание t_n в окно допуска: тогда при правильном выборе K вся переходная характеристика ляжет в допуск. Применение же приближений наподобие (3) и (4) практически неизбежно приведет к отбраковке начальных участков кабелей связи.

Конечно, для ликвидации этой ошибки можно ввести поправочные эмпирические коэффициенты, как это всегда делалось в кабельных расчетах. Но тогда гораздо лучше воспользоваться старыми традиционными выражени-

ями (1,2), в которых следует подставить $\ln(2b/a)$. Без конформных и иных затей, которые в таком случае совершенно теряют смысл.

Выводы

Исследования, проведенные в СамГТУ, ценны тем, что еще раз, и весьма весомо, подтверждают выводы, сделанные в работах [6, 7] и других: надо оставить Истории все, без исключения, приближенные методы расчета параметров кабельных изделий. Так как результат даже самой изысканной изобретательности в их «улучшении» вряд ли оправдывает затрачиваемые на это усилия. И может даже привести к обратному эффекту.

Мы еще раз убеждаемся в том, что для действительно серьезных кабельных расчетов и адекватного управления производственными процессами не обойтись без моделирования электромагнитных полей кабельных структур из «первых принципов». Тем паче, что кабельщики получили надлежащий для этого инструментарий. Например, цифровые автоматы [12], которые позволяют получать результаты на много порядков быстрее и точнее любых традиционных методик, и для любой мыслимой конструкции кабельного изделия.

Конформные же отображения, конечно, — полезный инструмент, но его возможности весьма ограничены. И в кабельных расчетах его целесообразно использовать лишь в качестве вспомогательного средства.

Особо хотим поблагодарить всех, кто принял живое участие в обсуждении изложенной темы на кабельном форуме RusCable.Ru (http://www.ruscable.ru/interactive/forum/show_msg-79816.html).

Литература

1. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления. Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Физ.-мат. Науки. — 2008, №1(16), С. 113—118, ISSN 19918615
2. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Расчет межпроводной индуктивности и емкости симметричных прямых пар методами конформных отображений и конечных элементов. «КАБЕЛЬ-news», №3 (13), 2007, С. 30—36.
3. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергоиздат, 1981.
4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Власов В.Е., Парфенов Ю.А. Кабели цифровых сетей электросвязи. Конструирование, технологии, применение. — М: Эко-Трендз, 2005.
6. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Несостоятельность некоторых традиционных методов расчета емкостных параметров триад и трехфазных кабелей. «КАБЕЛЬ-news», №12. 1. 2008, С. 44—48.
7. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Влияние скрутки на межпроводниковую емкость витых пар и триад. «КАБЕЛЬ-news», №4, 2007, С. 22—27.
8. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Влияние скрутки и других нарушений осевой симметрии кабельных конструкций на скорость распространения сигнала. «КАБЕЛЬ-news», №6—7, 2007, С. 48—54.
9. Рекомендации по проектированию систем FieldBus Foundation — FF AG-181 ревизия 2.0 2004
10. ГОСТ 52350.27-2005 Концепция искробезопасной системы полевой шины (FISCO) концепция невоспламеняющей системы полевой шины (FNICO).
11. Леонов В.М., Пешков И.В., Рязанов И.Б., Холодный С.Д. Основы кабельной техники. — М: Академия, 2006.
12. Хвостов Д.В., Вишняков Е.М., Никулин А.В. Цифровой автомат для расчета кабелей из «первых принципов». «КАБЕЛЬ-news», №5, 2009, С. 74—78.