

Снижение коэффициента затухания на высоких частотах путем улучшения качества поверхности медных жил

- 1 -

Постановка задачи.

Известно, что на высоких частотах плотность тока вытесняется на поверхность проводника – скин-эффект.

Известно, что форма сечения проводящих жил, применяемых для изготовления кабелей, не соответствует идеальной окружности.

Неравномерность рельефа поверхности проводника способствует тому, что ток вытесняется из долин в вершины рельефа. Следовательно, эффективная площадь сечения, в которой протекает ток, уменьшается с ростом глубины рельефа. Следовательно, увеличивается сопротивление и затухание.

**Оценить эффективность мероприятий,
направленных на снижение коэффициента затухания кабелей связи
за счет применения проводников идеальной формы (шлифованных жил).**

Снижение коэффициента затухания на высоких частотах путем улучшения качества поверхности медных жил

Коэффициент затухания кабелей α парной скрутки зависит от эффективного сопротивления металлических проводов $R(\delta)$, образующих пары. Эффективное сопротивление возрастает с ростом частоты из-за скин-эффекта – вытеснения тока на поверхность проводника при увеличении частоты.

Толщина скин-слоя δ (толщина трубки у поверхности цилиндрического проводника, в которой протекает такой же ток, как и в остальной толще проводника) в соответствии с (90.17) Фундаментального учебника И.Е. Тамма обратно пропорциональна корню из частоты $\omega=2\pi f$.

$$\delta = \frac{1}{p} = \sqrt{\frac{c^2}{2\pi\mu\lambda\omega}} \quad (90.17)$$

Частота, Гц	Алюминий, мкм	Медь, мкм δ	Мю-металл, мкм	Сталь, мкм	Цинк, мкм
50	11 700	9 330	248	1 200	17 400
100	8 270	6 600	175	851	12 300
10^3	2 620	2 090	55,4	269	3 900
10^4	827	660	17,5	85,1	1 230
10^5	262	209	5,54	26,9	390
10^6	82,7	66,0	1,75	8,51	123
10^7	26,2	20,9	0,554	2,69	39,0
10^8	8,27	6,60	0,175	0,851	12,3
10^9	2,62	2,09	0,0554	0,269	3,90
10^{10}	0,827	0,660	0,0175	0,0851	1,23

Толщина скин-слоя δ зависит от электромагнитных свойств проводников, что иллюстрирует таблица.

Снижение коэффициента затухания на высоких частотах путем улучшения качества поверхности медных жил

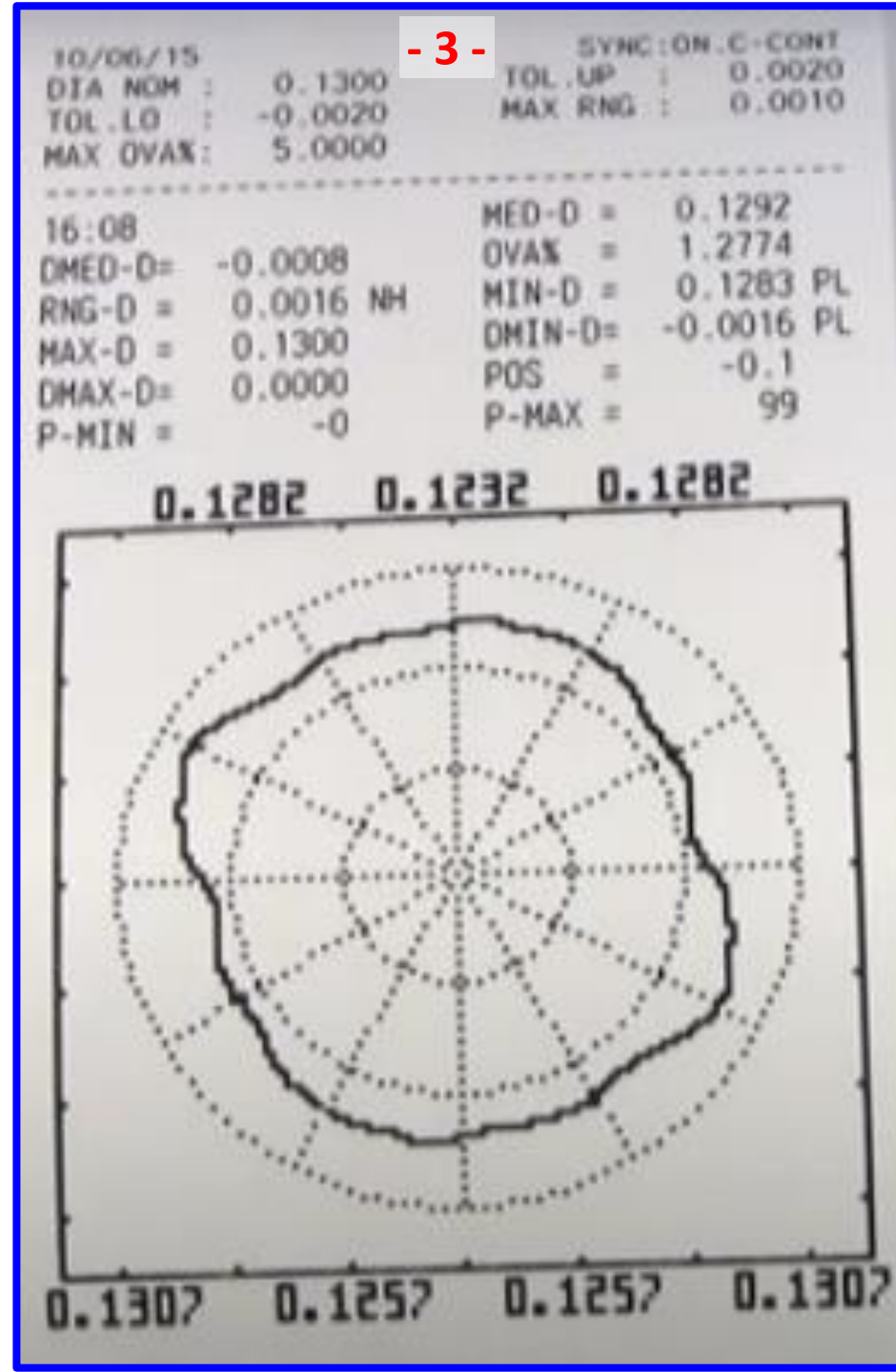
Можно предположить, что в случае наличия задиrow и иных неоднородностей на поверхности условно цилиндрического проводника линии тока будут вытесняться из долин в вершины рельефа.

Если «толщина рельефа» существенно **превосходит** толщину скин-слоя, то увеличение сопротивления за счет неоднородности поверхности проводника будет соизмеримо с минимально возможным сопротивлением проводника идеально цилиндрической формы.

Поэтому придание проводникам как можно более идеально цилиндрической формы (полировка проводников) потенциально способно уменьшить погонное сопротивление, что понизит затухание, благодаря чему можно

- или увеличить дальность линий передачи данных на необходимой скорости,
- или уменьшить диаметр жил для экономии меди.

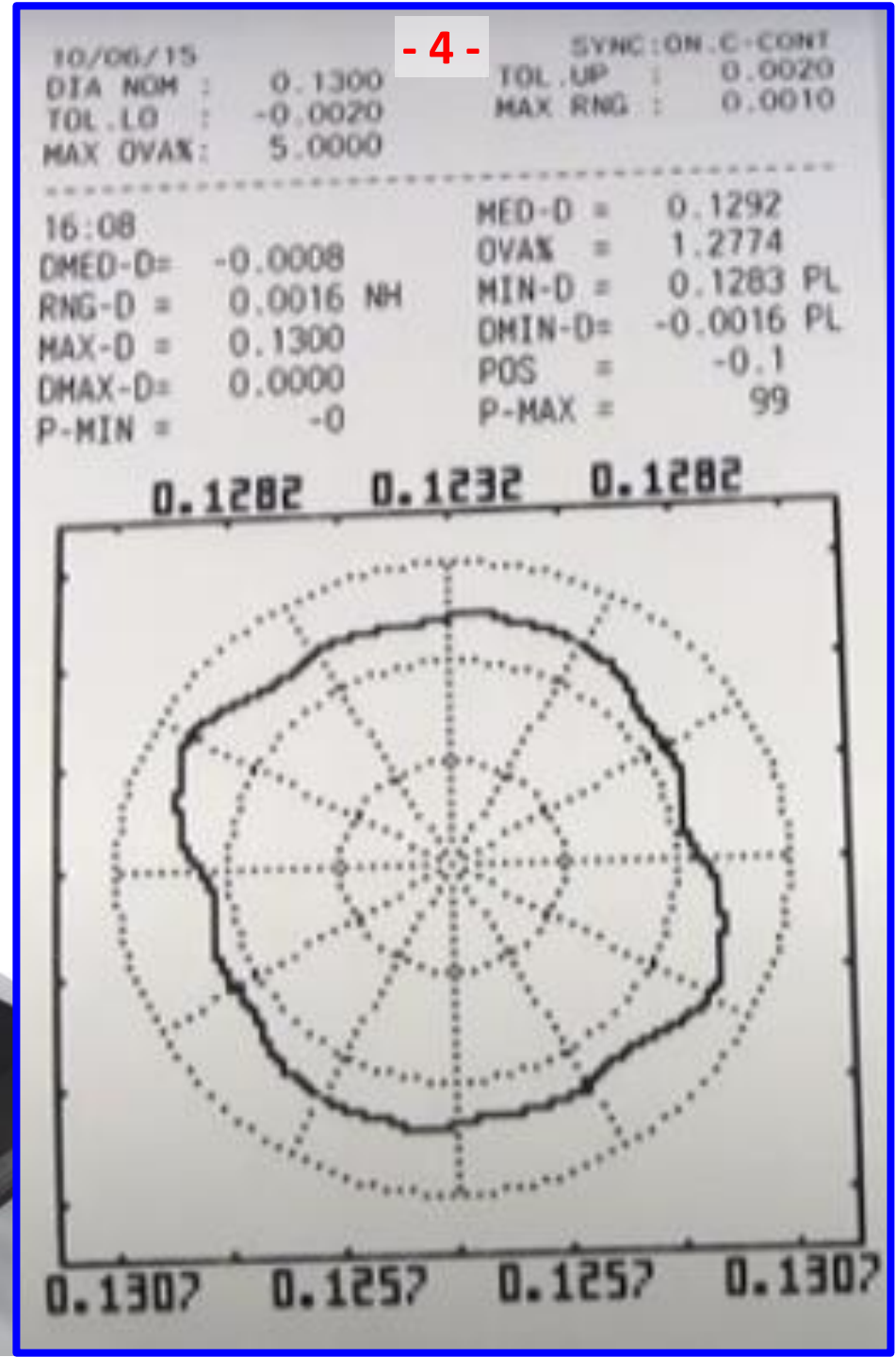
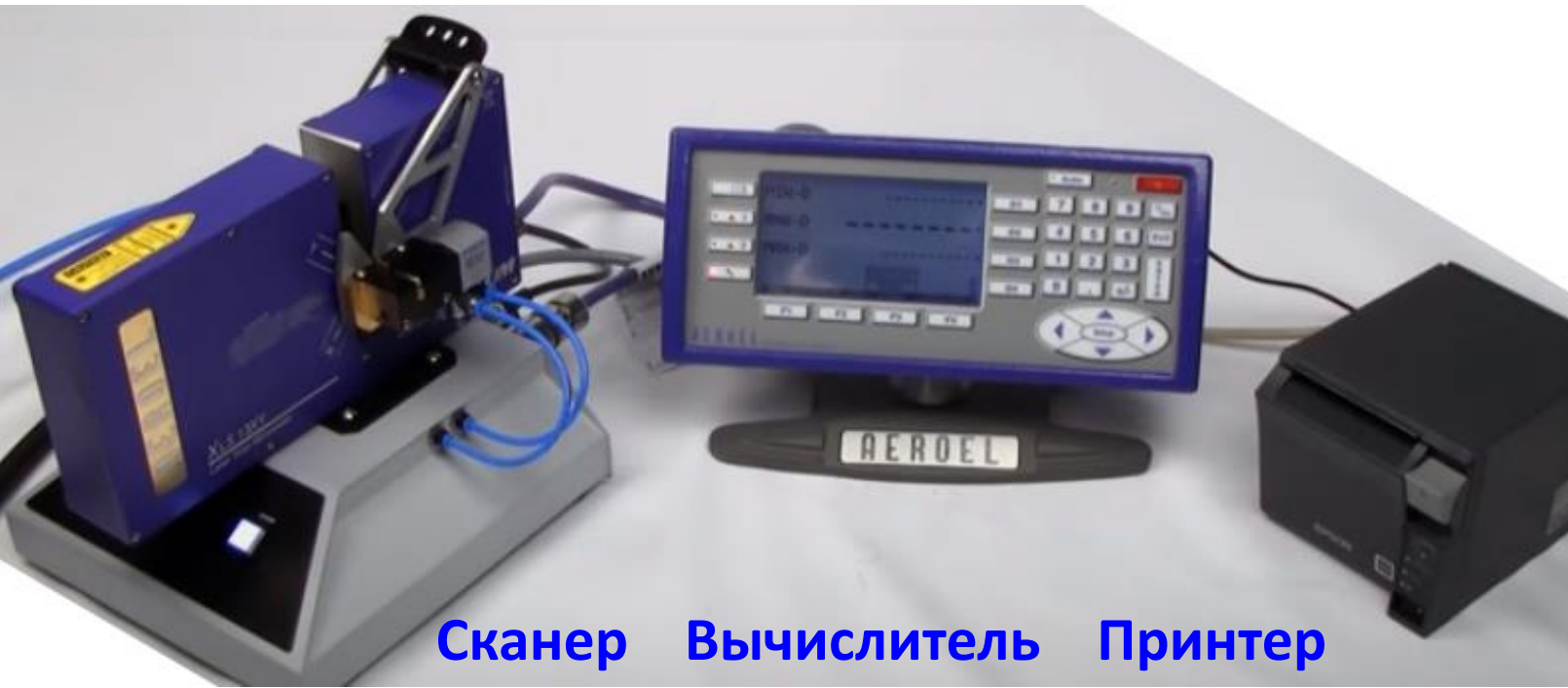
Таким образом, для обеспечения эффективности полировки жил следует оценить «толщину рельефа» Δ .



Снижение коэффициента затухания на высоких частотах путем улучшения качества поверхности медных жил

Для определения «толщина рельефа»
может быть применен, например,
лазерный микрометр SUPER-WIRELAB.XY
итальянской компании Aeroel.

Соответствующее видео,
демонстрируя процедуру измерения диаметра,
наглядно показывает все операции и
представляет пример протокола.

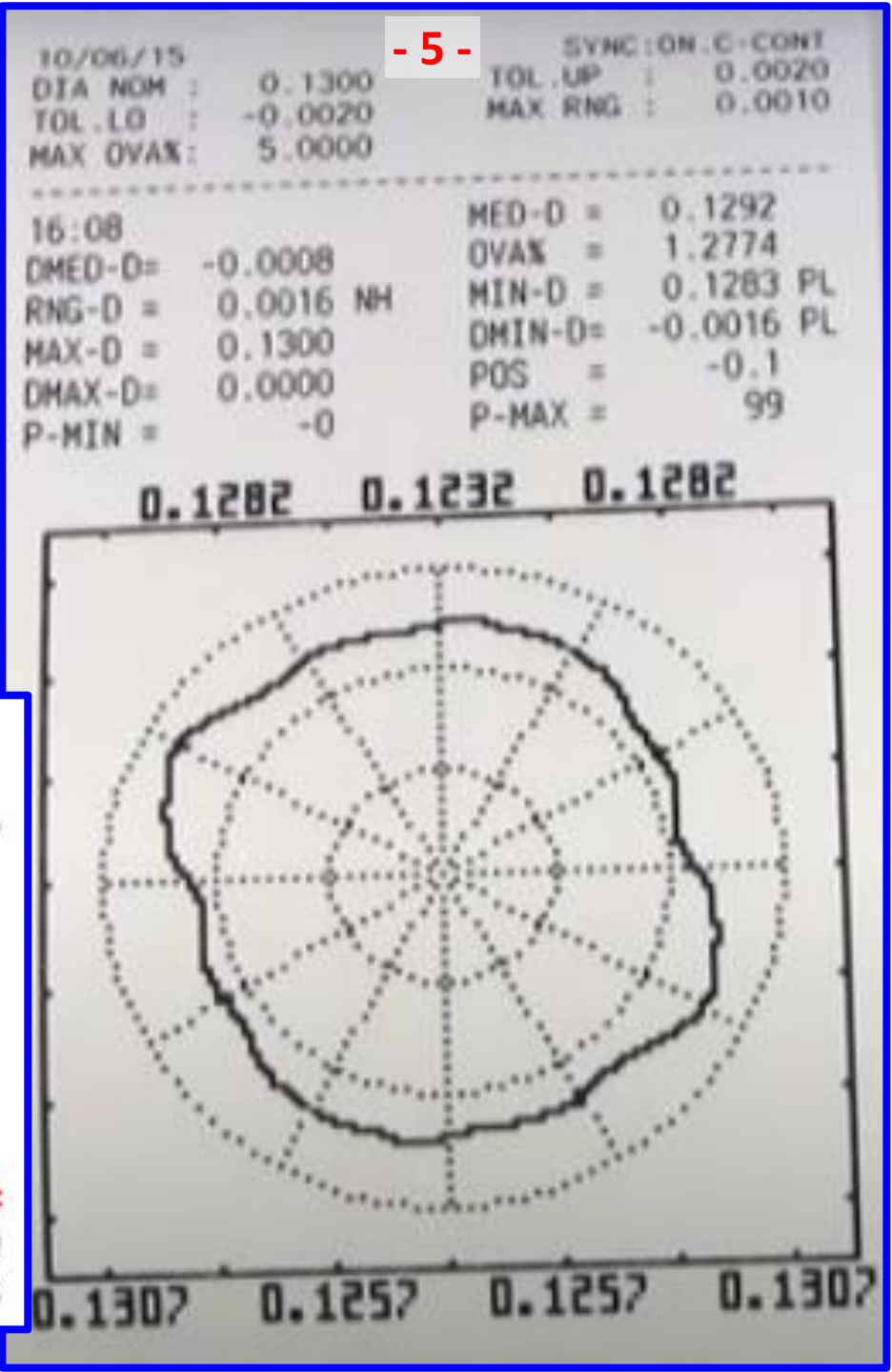


Снижение коэффициента затухания на высоких частотах путем улучшения качества поверхности медных жил

Для определения эффективности полировки следует сопоставить

- толщину скин-слоя на частоте, определяемой категорией кабеля или диапазоном частот СПД, на которые ориентирован кабель, и
- фактическую «толщину рельефа» применяемых проводов.

Например, для частоты = 100 МГц толщина скин-слоя $\delta = 6,6$ мкм. В конкретном протоколе диаметр изменяется в пределах 123,2...130,7 мкм, т.е. «толщина рельефа» $\Delta = (130,7 - 123,2) / 2 = 3,8$ мкм, что составляет 2,9% от диаметра.



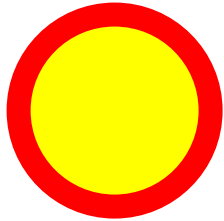
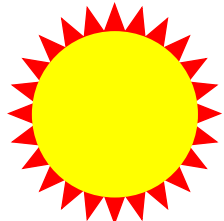

10/06/15
 DIA NOM : 0.1300
 TOL LO : -0.0020
 MAX OVAX : 5.0000
 SYNC: ON, C-CONT
 TOL UP : 0.0020
 MAX RNG : 0.0010
 16:08
 DMED-D = -0.0008
 RNG-D = 0.0016 NH
 MAX-D = 0.1300
 DHAX-D = 0.0000
 P-MIN = -0
 MED-D = 0.1292
 OVAX = 1.2774
 MIN-D = 0.1283 PL
 DMIN-D = -0.0016 PL
 POS = -0.1
 P-MAX = 99

Частота, Гц	Алюминий, мкм	Медь, мкм	Мю-металл, мкм	Сталь, мкм	Цинк, мкм
50	11 700	9 330	248	1 200	17 400
100	8 270	6 600	175	851	12 300
10 ³	2 620	2 090	55,4	269	3 900
10 ⁴	827	660	17,5	85,1	1 230
10 ⁵	262	209	5,54	26,9	390
10 ⁶	82,7	66,0	1,75	8,51	123
10 ⁷	26,2	20,9	0,554	2,69	39,0
100 МГц	8,27	6,60	0,175	0,851	12,3
10 ⁹	2,62	2,09	0,0554	0,269	3,90
10 ¹⁰	0,827	0,660	0,0175	0,0851	1,23

путем улучшения качества поверхности медных жил

Толщина скин-слоя δ не зависит от диаметра проволоки.

Модель влияния «толщины рельефа» Δ на сопротивление провода не найдена в литературе (это не означает, что этот вопрос не изучался специалистами). Можно предложить следующую грубую модель:

Соотн.	Пояснение	Занимаемая ВЧ-током эффективная площадь сечения	Сопротивление жил R в зависимости от соотношения δ/Δ и фундаментальной зависимости сопротивления скин-слоя $R_0(\delta)$
$\delta \gg \Delta$	Провод шлифован или скин-слой много толще рельефа. В этом случае шероховатость не оказывает влияния на площадь сечения. 50% тока течет в скин-слое, еще 50% - в толще проводника.	 100%	$R = 1,00R_0(\delta)$
$\delta = \Delta$	Половина тока течет в «толще рельефа», вторая половина тока течет в основной толще проводника. Если считать, что толща рельефа заполнена проводником наполовину, то эффективная площадь составляет 25+50%.	 75%	$R = 1,33R_0(\delta)$
$\delta \ll \Delta$	Поверхность провода груба и скин-слой много тоньше рельефа. Ток течет практически только в «толще рельефа» и вытеснен из ущелий в вершины, то есть протекает по 50% площади поверхностного слоя.	 50%	$R = 2,00R_0(\delta)$

$$R = \left(\frac{0,43}{0,43 + \frac{\delta}{\Delta}} + 1 \right) R_0(\delta)$$

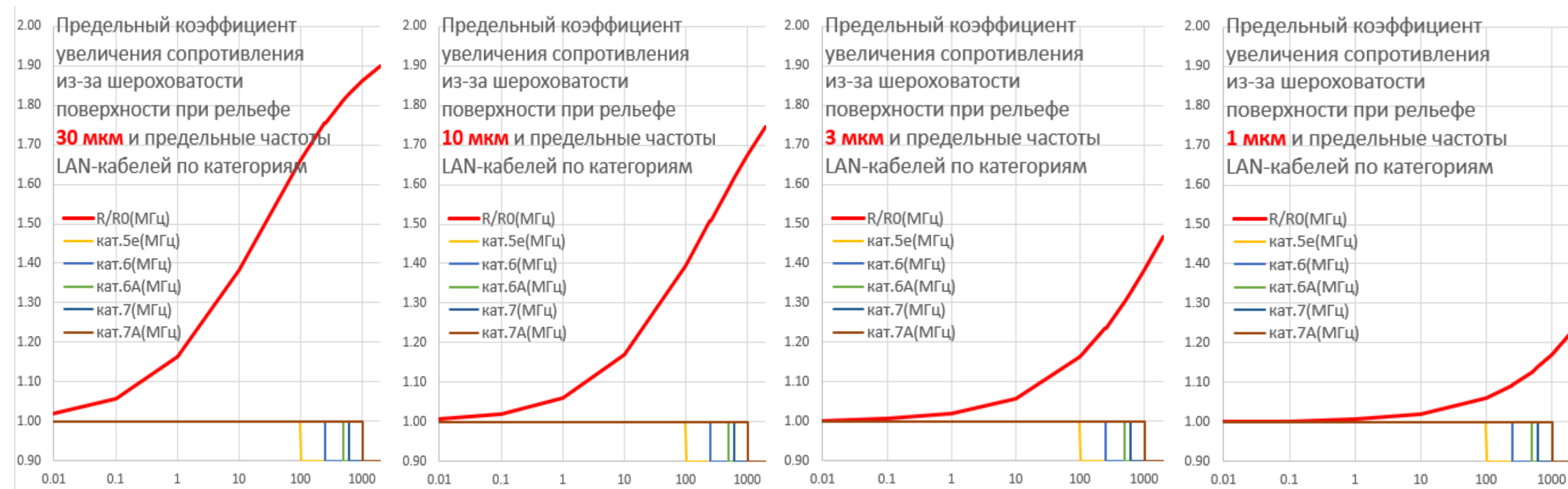
- аппроксимация

Снижение коэффициента затухания на высоких частотах

- 7 -

путем улучшения качества поверхности медных жил

Полученная модель позволяет оценить коэффициент увеличения сопротивления из-за шероховатости поверхности жилы. Этот коэффициент представляет собой ресурс, которым может располагать производитель кабелей, обладающий технологиями шлифовки жил, т.е. снижения глубины рельефа.



Эффективность шлифовки жил повышается:

- с увеличением верхней границы полосы частот, в которой нормируются характеристики кабелей,
- с ростом начальной шероховатости, технологически свойственной применяемым жилам.

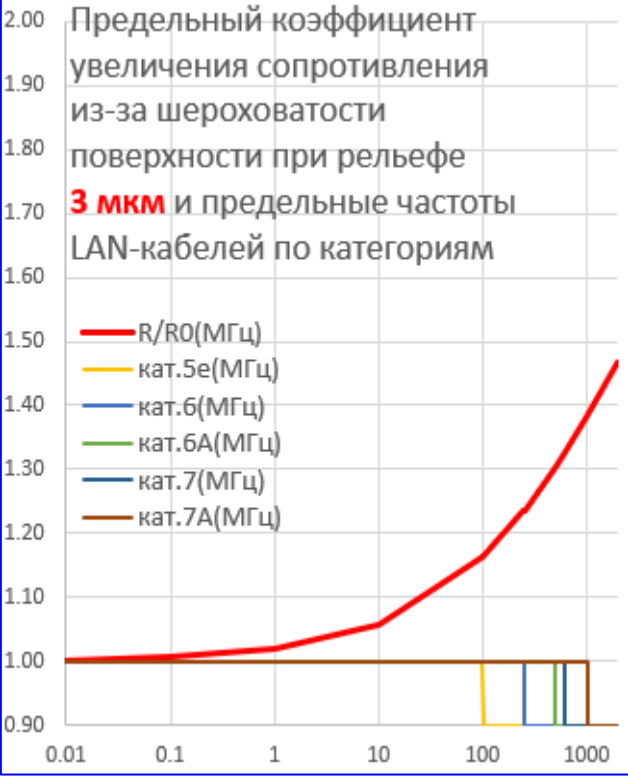
Снижение коэффициента затухания на высоких частотах

путем улучшения качества поверхности медных жил

Если предположить, что исходная «высота рельефа» (шероховатость) составляет **3 мкм** (0,6% от диаметра жилы 0,52 мм), то шлифовка жил при сохранении площади сечения способна потенциально уменьшить сопротивление R на верхней границе полосы частот в

- 1,02** раза на частоте **1 МГц**,
- 1,04** раза на частоте **4 МГц**,
- 1,06** раза на частоте **10 МГц**,
- 1,16** раза на частоте **100 МГц (кат.5е)**,
- 1.36** раза на частоте **1000 МГц (кат.7А)**.

Так как коэффициент затухания α пропорционален сопротивлению проводников, которое в силу скин-эффекта (истончение поверхностного слоя) увеличивается с ростом частоты, то пропорционально может быть уменьшено затухание, или площадь сечения, или длина линии на заданной скорости передачи данных.



$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

путем улучшения качества поверхности медных жил

Для инструментального подтверждения эффективности шлифования жил следует измерить погонное сопротивление нешлифованных и шлифованных жил.

Но так как в результате технологической операции шлифования может измениться эффективная площадь сечения провода, то практические измерения должны проводиться не по вторичным параметрам (затухание или тем более скорость передачи), а по первичным – погонное сопротивление.

Сопротивление следует измерять на постоянном токе для калибровки и в диапазоне частот.

Значения сопротивления на постоянном токе используются для приведения друг к другу результатов измерений сопротивления в диапазоне частот образцов – нешлифованного и шлифованного.

ЧХ сопротивления жил измеряется системным методом, непосредственно поддерживаемым ПО анализатора A-7/307 в полосе до 4 МГц. В отсутствие такого анализатора могут быть применены анализаторы A-7/301 или A-7/311 и программа поддержки системного метода A15p.exe.

Потенциально на верхней частоте, обеспечиваемой анализатором A-7 (4 МГц), может быть инструментально подтверждена эффективность шлифования, которая, как было показано выше, может достичь 4%, для чего следует использовать отрезки кабеля длиной 10 м, как это будет показано ниже.



A15 - Cable Analyzer

The measured parameters of short circuit and idling:

Rxx, Ohm =	10.5970	Ввести активную и реактивную
Xxx, Ohm =	-971.4100	составляющие, измеренные измерителем
Rkz, Ohm =	4.4924	иммитанса E7-25, E-7-28, E7-29...
Xkz, Ohm =	17.8714	в режимах XX (Rxx, Xxx) и K3 (Rkz, Xkz)
f, kHz =	100.0000	на дальнем конце измеряемого кабеля.
L, m =	40.0000	Ввести измерительную частоту и длину кабеля.

The calculated secondary parameters:

a, dB/km =	3.7653	Получить вторичные параметры
b, rad/km =	3.3948	на измерительной частоте
Zb, Ohm =	133.7969	a, b - коэффициенты затухания и фазы,
Zb, grd =	-6.7426	Zb - импеданс - модуль и фазовый угол

The calculated Primary parameters:

R, Ohm/km =	110.9227	Получить первичные параметры -
L, uH/km =	707.0266	погонные сопротивление, индуктивность,
C, nF/km =	40.7059	емкость на измерительной частоте

Снижение коэффициента затухания на высоких частотах

путем улучшения качества поверхности медных жил

При выборе образцов следует иметь в виду, что при вычислении первичных параметров кабеля (в т.ч. погонного сопротивления) проявляется ограничение частотного диапазона.

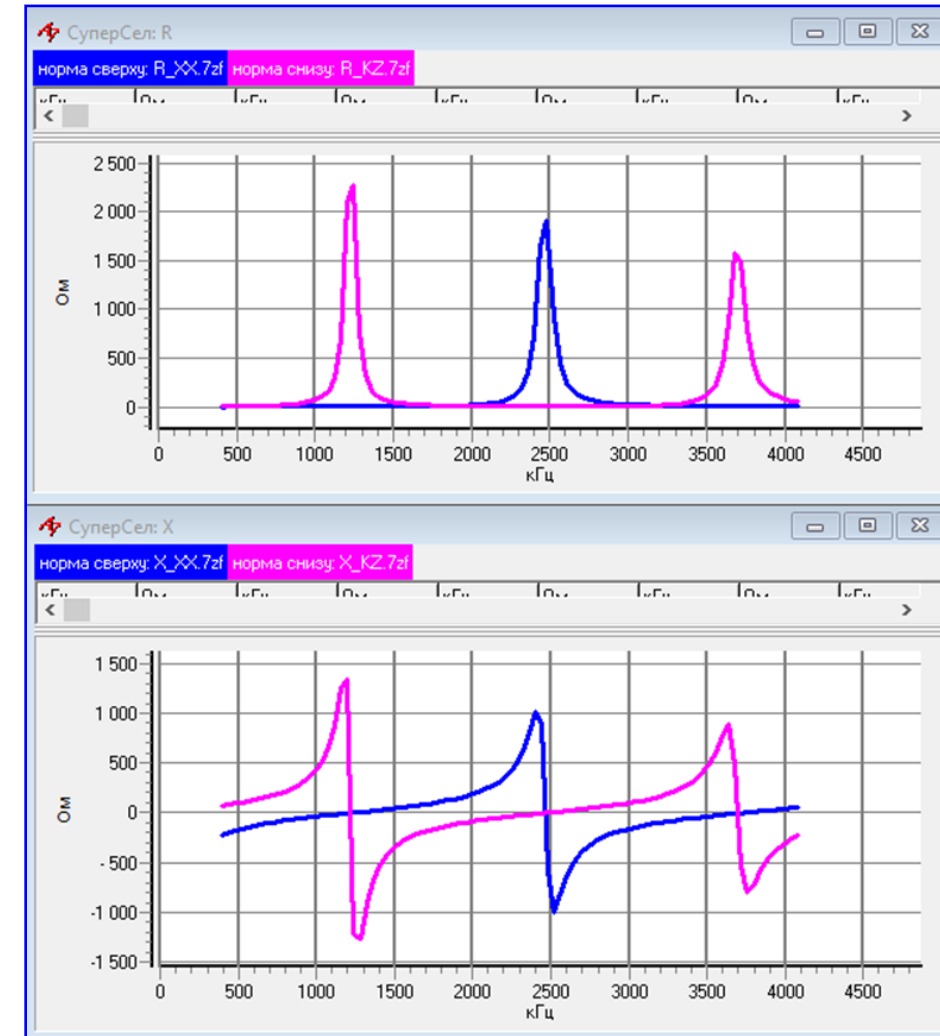
Результаты вычислений достоверны в полосе частот от 0 до $\frac{1}{2}$ резонансной частоты F_0 , определяемой формулой

$$F_0 = (v/2)/L$$

где v - скорость электромагнитной волны в кабеле (для кабелей с ПЭ-изоляции $v=200$ м/мкс),
 L - длина кабеля в метрах.

Результаты измерений системным методом первичных параметров доступны до верхней частоты не выше 40% от резонансной.

Длина Кабеля, м	Fmax, МГц
40,0	1
13,3	3
4,0	10
1,3	30
0,4	100



Измеренные ЧХ импеданса **в режиме ХХ** и **в режиме КЗ** на дальнем конце кабеля **КТЦПм 1x2x0.8** длиной $L=40$ м. Резонансная частота $F_0=2500$ кГц ($\frac{1}{2}F_0=1250$ кГц). На восходящем участке ЧХ возрастает погрешность, что заставляет ограничить частоту в пределах $0...0,4F_0$

Снижение коэффициента затухания на высоких частотах

путем улучшения качества поверхности медных жил

Пример результатов измерений импеданса кабеля КТЦПм 1x2x0.8 длиной 40 м. Используются анализатор А-7/301 режимы ХХ и КЗ.

F, kHz	R_XX, Ом	X_XX, Ом	R_KZ, Ом	X_KZ, Ом	a, дБ/км	Zb, Ом	R, Ом/км	L, мкГн/км	C, нФ/км
0.0							По прецизионному омметру		
0.1	195955	-925521	2.919	1.726	0.240	1791.12	71.87	66174	40.21
1	-600.423	-98795	2.867	0.185	0.801	532.76	71.68	736.09	40.27
10	-6.269	-9891.9	2.878	1.842	1.937	183.85	71.95	732.86	40.22
100	1.266	-983.884	3.730	18.055	2.986	134.68	92.12	714.22	40.20
400	3.241463	-224.209	7.31006	74.33518	5.289	129.42	149.43	671.51	40.25
600	3.930406	-130.317	11.3143	126.1877	6.492	128.52	170.08	662.20	40.18
800	4.41175	-76.561	21.3796	213.1976	7.539	128.19	181.32	657.48	40.07
1000	4.785948	-37.647	69.3516	429.978	8.430	128.57	193.93	657.43	39.81
Измерение посредством А-7/301 сер.№ 009.0176							Расчет по программе А15р.exe		

Расчет выполнен посредством А15р.exe

- вторичных параметров – методом 6 по ГОСТ 27893 и
- первичных параметров – системным методом.

Результаты следует дополнить измерением сопротивления шлейфа жил по постоянному току, выполненным прецизионным омметром.

Результаты измерений R, Ом/км для кабеля с обычными и шлифованными жилами следует привести друг к другу через сопротивление на постоянном токе.

