

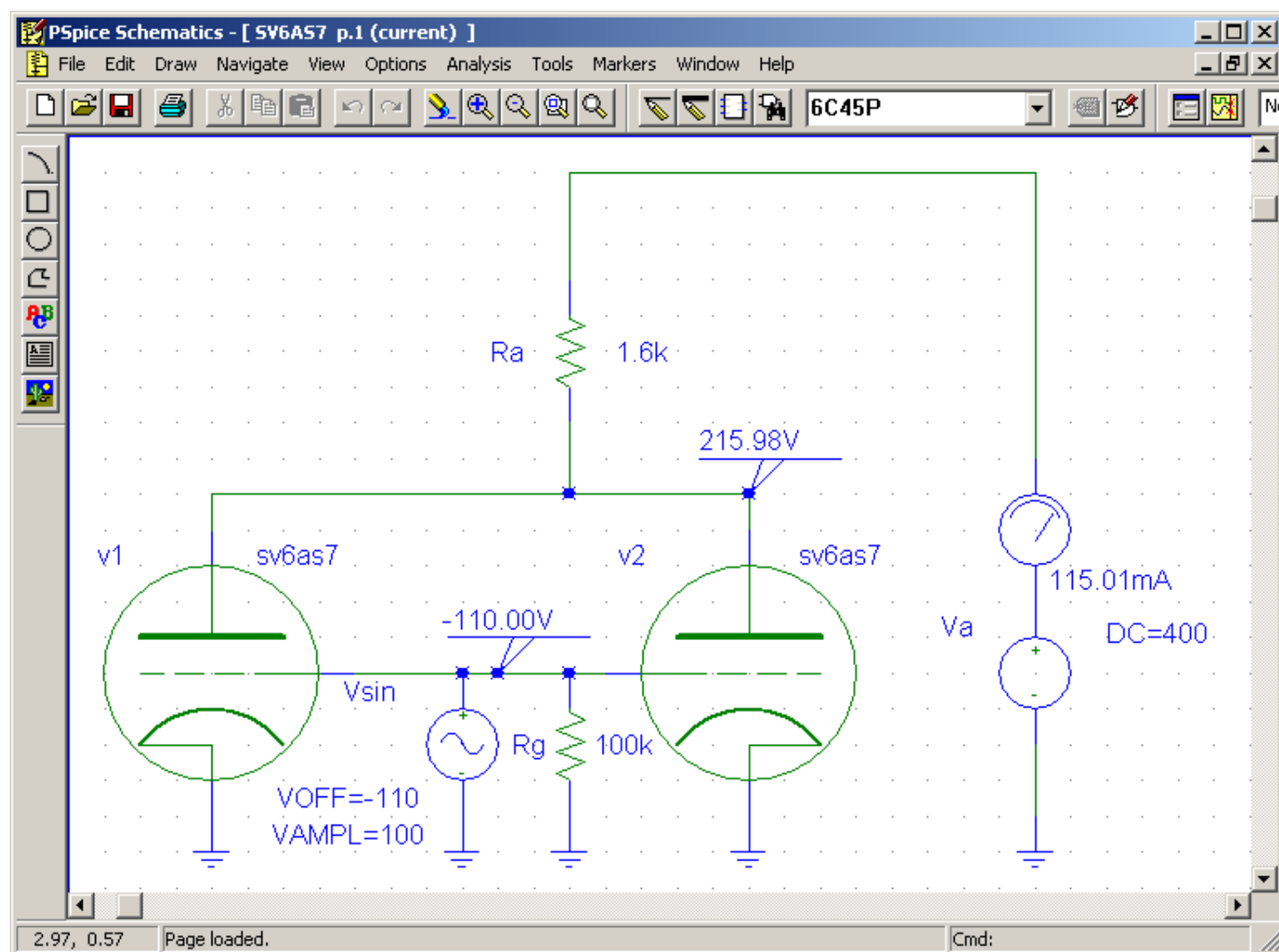
## Пример расчета выходного каскада

Я покажу на примере расчет однотактного (SE) каскада с параллельным включением триодов (это уже сокращается как PSE). Расчет включает определение рабочей точки лампы, а также мощности и напряжения на ее нагрузке. Эти шаги выполнены при помощи программы Pspice student, которая использовалась автором “как есть” и поэтому никакими комментариями по поводу собственно программы не сопровождаются. Остальные шаги представлены как результат использования программы Tube TransCalc, которая является продуктом автора этих строк, и поэтому может быть использована как инструкция по ее использованию. В этой инструкции нет описания банальных манипуляций мышкой и клавиатурой, так как в наше время даже для пацанов, жующих жвачку и одновременно набирающих SMS-сообщение на мобилке, это не есть проблема.

Выбор лампы выходного каскада – ответственная задача. Я с ней справился, читая статьи в Интернете и прогуливаясь по радиобазару. Результатом прогулок было какое-то количество добытых экземпляров 6H5C. Поскольку лучше сначала считать, чем строгать, мотать и паять, было принято решение смоделировать каскад на доступной Spice-модели SV6AS7. Вопрос об идентичности ламп SV6AS7 и 6H5C мной не рассматривался. Даже при их расхождении параметры 6H5C будут не лучше параметров SV6AS7. А уж для регулировки реального каскада на 6H5C всегда есть средства в виде подстройки анодного напряжения и сеточного смещения.

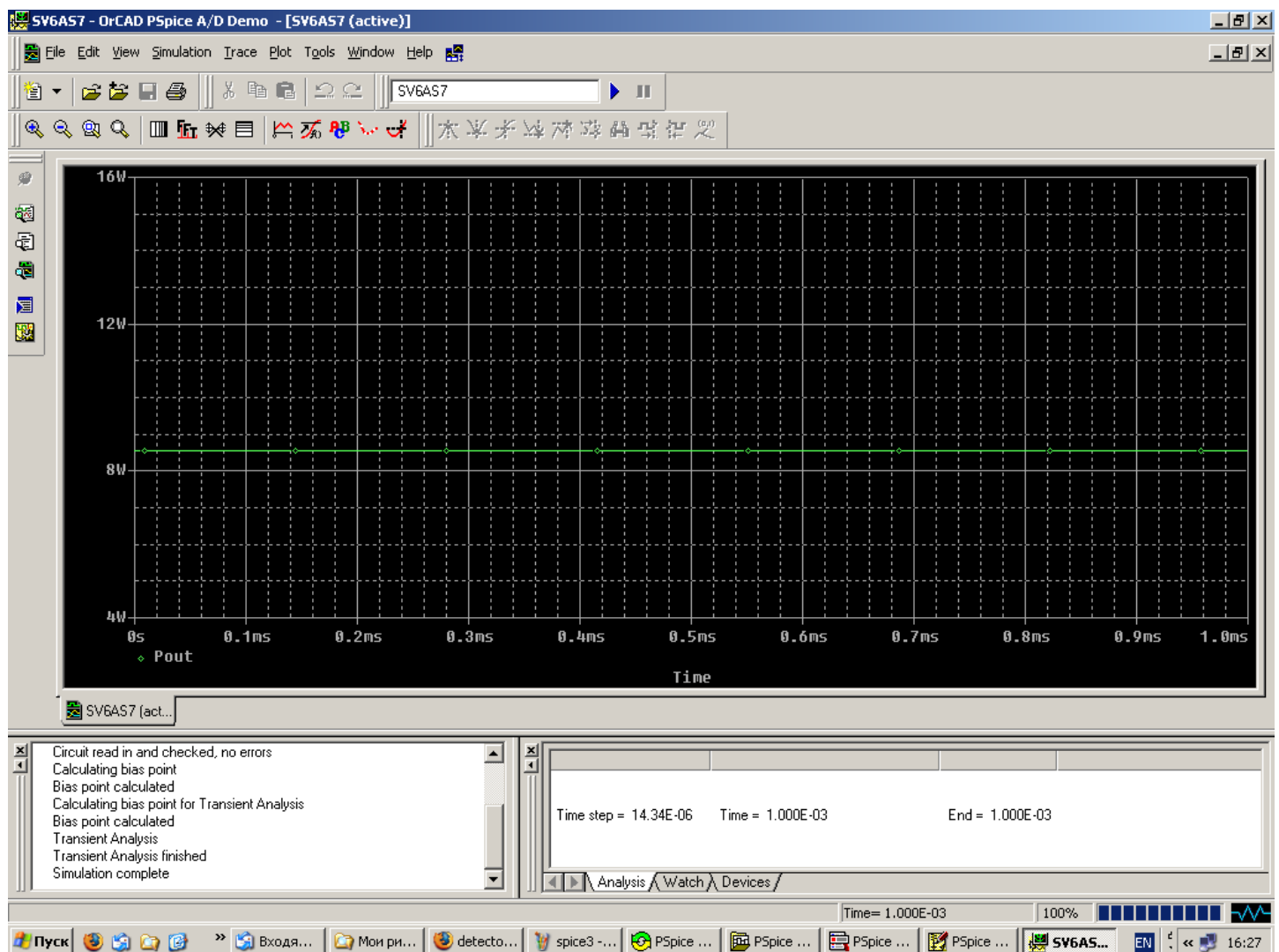
## PSpice

Схема на Pspice Schematics выглядит так:

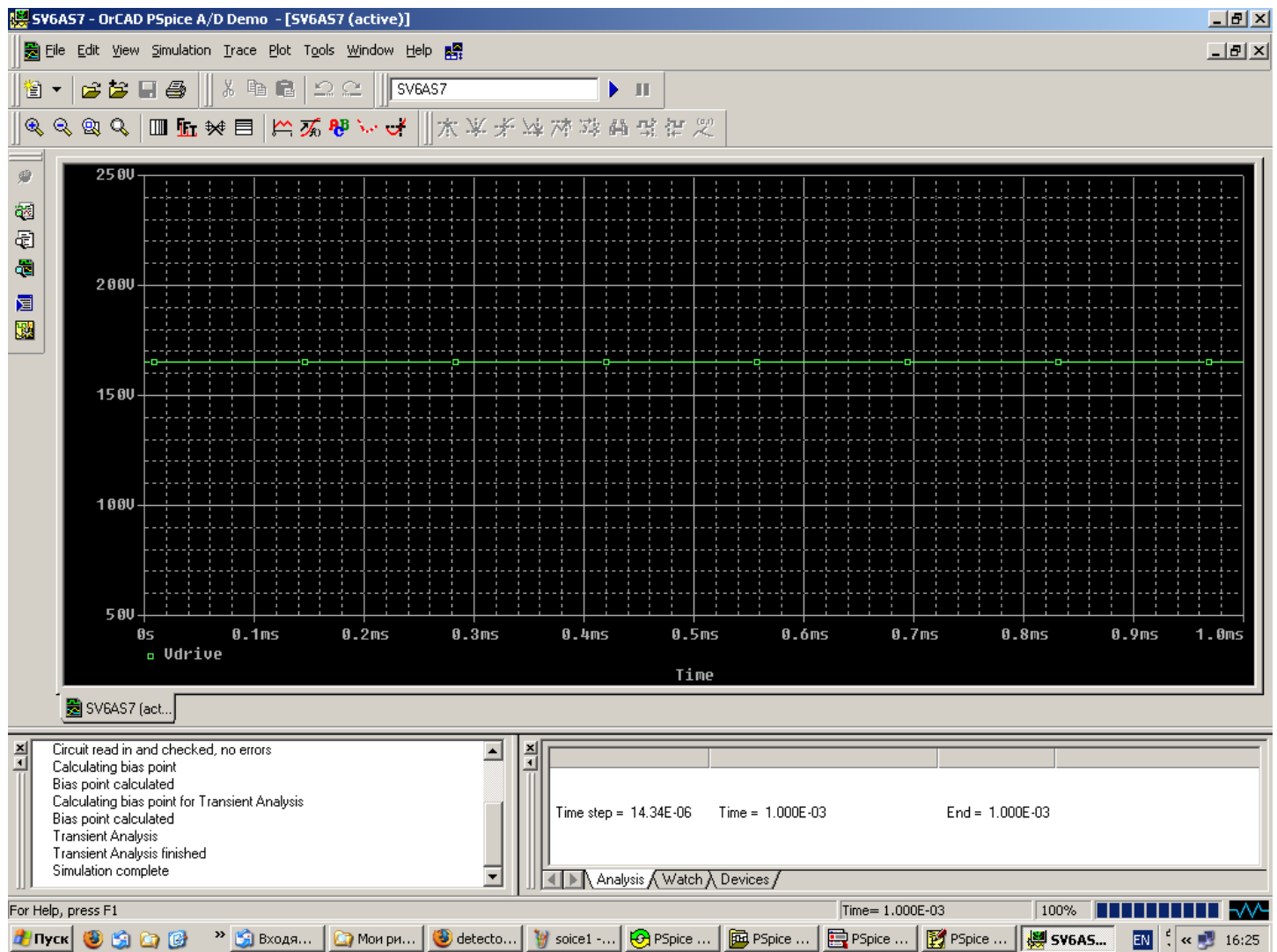


Это схема с фиксированным смещением, которое обеспечивается источником  $V_{sin}$  (здесь он также обеспечивает сигнал 1000Гц с уровнем 100V). Нагрузкой каскада служит резистор  $R_a=1,6K$ . Дело в том, что с одной стороны, классик Цыкин рекомендует выбирать сопротивление переменному току первичной обмотки в 3...7 раз больше внутреннего сопротивления лампы переменному току, а с другой стороны, трансформатор UBT-1 фирмы One Electron имеет  $R_{\Sigma}=1,6K$  и рекомендован как раз для 6AS7 в режиме PSE. (При внутреннем сопротивлении переменному току двух параллельно включенных баллонов, равным  $225\Omega$ , имеем  $1600:225=7,1$ .) Так что можно считать, что требование Цыкина подтверждено достойным современным производителем, и нам больше не о чем беспокоиться. Правда резистор  $R_a$  не похож на трансформатор, но ведь и это не принципиальная, а скорее эквивалентная схема, где индуктивность в нагрузке никак не влияет на работу каскада, а потому заменена активной нагрузкой. Значение напряжения источника постоянного тока  $V_a$  выбрано равным 400V для обеспечения на анодах триодов напряжения 215V. Таким образом, при смещении -110V суммарный ток через оба триода будет равен 115mA. В реальной конструкции активное сопротивление первичной обмотки трансформатора (которое обеспечивает ток покоя) будет существенно меньше, а потому и напряжение источника тоже будет меньше. Так, если активное сопротивление первичной обмотки трансформатора равно  $100\Omega$ , а суммарный ток через триоды должен быть равен расчетному значению 115mA, то напряжение источника, питающего каскад в режиме полного молчания, должно быть равным  $215+100 \times 0,115=215+11,5=226,5V$ . Хочу подчеркнуть, что обеспечение расчетного тока, анодного напряжения и заданного смещения важны в равной степени, так как именно эта комбинация параметров обеспечивает расчетную мощность и коэффициент гармоник (здесь, кстати, он равен 2,6% на полной мощности).

Запуск процесса моделирования этой схемы дает график максимальной мощности синусоидального сигнала с частотой 1000Гц:



8,5W на нагрузке  $R_a$  – тоже неплохо. В виде переменного напряжения на концах нагрузки  $R_a$  это выглядит так:



Запомним на будущее, что это составляет 165V.

## Tube TransCalc

Теперь настала очередь разобраться с выходным трансформатором. Как обычно в таких случаях, я перед проектированием почитал Цыкина, походил по барахолкам, а также написал программу Tube TransCalc. Изучение конъюнктуры рынка (хождение по барахолкам в наши дни называется именно так) показало: кроме как на стержневые сердечники от трансформаторов ТС-270, ТС-180, ТС-100 и т.д. рассчитывать не приходится.

Первым делом запускаем программу Tube TransCalc, выбираем страницу “Предварительный расчет” и сообщаем ей желаемые показатели трансформатора.

The screenshot shows the TubeTransCalc software interface with the following sections:

- Предварительный расчет** | **Конструктивный расчет** | **Таблицы и графики конструктивного расчета** | **Исходные таблицы и графики**
- Симметрия и конструкция**
  - AA/I | AA/II | AB/I | A/I | A/II
  - Однотактные: Броневой, Стержневой 1, Стержневой 2, **Стержневой 3**, Стержневой 4
  - Первичная (blue) / Вторичная (red) winding diagram
- Материал сердечника**: 3310
- Мощность и ток подмагничивания**:  $P_1 = 8,500$  [W],  $I_0 = 115,00$  [mA]
- Общие параметры**
  - Вид нагрузки: **Активная** (Inductive load options are disabled)
  - Индуктивная нагрузка: Нет (Correcting capacitor options are disabled)
  - Заданное сопротивление:  $R_{\Sigma} = 1600$  [Ω] or  $R_{out}$  (Not specified)
  - $R_1 = 225$  [Ω],  $f_1 = 20$  [Hz],  $R_2 = 4$  [Ω],  $M_{dbl} = -3,00$  [dB]
  - $\eta = 0,95$ ,  $f_h = 20000$  [Hz],  $c = 0,500$ ,  $M_{dbh} = -3,00$  [dB]
- Параметры сердечника**
  - Начальная эквивалентная магнитная проницаемость:  $L_1 I_0^2 = 0,0228876186484956$ ,  $\mu_A(LI_0^2) = 250$
  - Выбор из списка: ☒ ПЛ 25x50x100
- Results Table (Right Panel)**

$\dot{w}$	801,584799818138
$\ddot{w}$	82,2408651973922
$\dot{r}$	13,3333333333333 [Ω]
$\ddot{r}$	0,280701754385965 [Ω]
$\dot{L}$	0,64902028831693 [H]
$\dot{L}_s$	0,00724422263874314 [H]
$n$	0,0512989176042577
$c$	0,5
$\eta$	0,95
$w_1$	1603,16959963628
$w_2$	82,2408651973922
$r_1$	26,6666666666667 [Ω]
$r_2$	0,140350877192983 [Ω]
$L_1$	2,59608115326772 [H]
$L_s$	0,0144884452774863 [H]
$\sigma$	0,00558089074343823
$U_{1max}$	164,924225024706 [V]
$P_{1max}$	8,5 [W]
$U_{2max}$	7,046498646763 [V]
$P_{2max}$	8,075 [W]
$B_{max}$	7000 [Gs]
$f_1$	20 [Hz]
- Notes**:
  - Количество витков первичной обмотки рассчитано по допустимой индукции. Частотные искажения на нижней рабочей частоте -1,59053747583972 dB.

Здесь наименее очевидным является выбор топологии трансформатора на вкладке “Симметрия и конструкция”. Название мини-странички “А/Г” обозначает, что данный трансформатор работает в однотактном каскаде с подмагничиванием, а радиокнопка “Стержневой 3” показывает, что будет использован стержневой сердечник и половинки обмоток на разных катушках трансформатора будут соединены между собой как показано на соседнем рисунке.

Скажем прямо – указанные нами параметры трансформатора не ахти какие: спад частотной характеристики на краях диапазона 20...20000 Гц составляет -3dB. Но к большому сейчас лучше не стремиться, так как малый спад на верхней частоте достигается конструктивными приемами, которые решаются не здесь и не сейчас, а заказ малого спада на нижней частоте лишь приведет к сужению перечня рекомендуемых сердечников. Этот перечень можно увидеть на выпадающем списке справа от надписи “Выбор из списка” (чтобы список появился, нужно поставить галочку в маленьком окошечке между надписью и окном для списка). Я выбрал сердечник ПЛ 25x50x100, так как он ближе всего по размерам к сердечнику трансформатора ТС-270.

На передвижной панели справа представлены многочисленные параметры, описывающие все мыслимые параметры трансформатора. Но не будем забывать, что это не более чем виртуальный трансформатор, пользы от которого ровно ноль. Все эти числа для меня были важны на этапе написания программы для контроля правильности расчетов, так как тогда было важно абсолютно все. Сейчас же все эти числа в совокупности могут быть важны только для человека, созерцающего подобно господину Богу свой пупок в течение бесконечного времени, прошедшего до сотворения мира. Нам для дальнейшего пригодятся только значения  $\dot{w}=801$  (число витков первичной обмотки на одной катушке трансформатора)

Д:\AudioProjects\Audio Trans Project\TubeTransCalc\6H5C\_TC-270.trf - TubeTransCalc

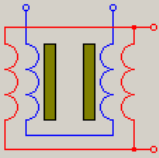
Предварительный расчет | Конструктивный расчет | Таблицы и графики конструктивного расчета | Исходные таблицы и графики

### Симметрия и конструкция

AA/I | AA/II | AB/I  
A/I | A/II

Первичная Вторичная

Однотактные  
☐ Броневой  
☐ Стержневой 1  
☐ Стержневой 2  
☒ Стержневой 3  
☐ Стержневой 4



### Материал сердечника

Э310

### Мощность и ток подмагничивания

$P_1$  8,500 [W]  $I_0$  115,00 [mA]

### Общие параметры

Вид нагрузки  
☒ Активная  
☐ Индуктивная

Индуктивная нагрузка  
 Корректирующая цепочка  
☒ Нет ☐ Есть

Заданное сопротивление  
 $R_{\omega}$  1600 [ $\Omega$ ]  
 или  
 $R_{out}$  Не задано [ $\Omega$ ]

$R_i$  225 [ $\Omega$ ]  $f_1$  20 [Hz]  
 $R_2$  4 [ $\Omega$ ]  $M_{dbl}$  -3,00 [dB]  
 $\eta$  0,95  $f_h$  20000 [Hz]  
 $c$  0,500  $M_{dbh}$  -3,00 [dB]

$P > 0.1$   $I > 0$

Допустимая индукция в сердечнике  
 Выбор  $B_{adm}$  7000 [Gs]

Начальная эквивалентная магнитная проницаемость  
 $L_1 I_0^2$  0,0228876186484956  
 $\mu_A (L I_0^2)$  250

Параметры сердечника  
 $A$  38,83  $\times 10^{-5}$   $q_c$  11,50 [ $cm^2$ ]  
 $D$  194,26  $\times 10^{-6}$   $l_c$  35,86 [cm]  
 $l_0$  19,39 [cm]

Выбор из списка ☒ ПЛ 25X50X100

Количество витков первичной обмотки рассчитано по допустимой индукции. Частотные искажения на нижней рабочей частоте -1,59053747583972 dB.

$L_s$  0,0144884452774863 [H]  
 $\sigma$  0,00558089074343823

$U_{1max}$  164,924225024706 [V]  
 $P_{1max}$  8,5 [W]  
 $U_{2max}$  7,046498646763 [V]  
 $P_{2max}$  8,075 [W]  
 $B_{max}$  7000 [Gs]  
 $f_1$  20 [Hz]

$R_{\omega}$  1600 [ $\Omega$ ]  
 $R_i$  225 [ $\Omega$ ]  
 $R_{out}$  0,802631578947369 [ $\Omega$ ]  
 $R_2$  4 [ $\Omega$ ]  
 $Df$  4,98360655737705

$K_d$  [dB]  
 $U_{1min}$  [V]

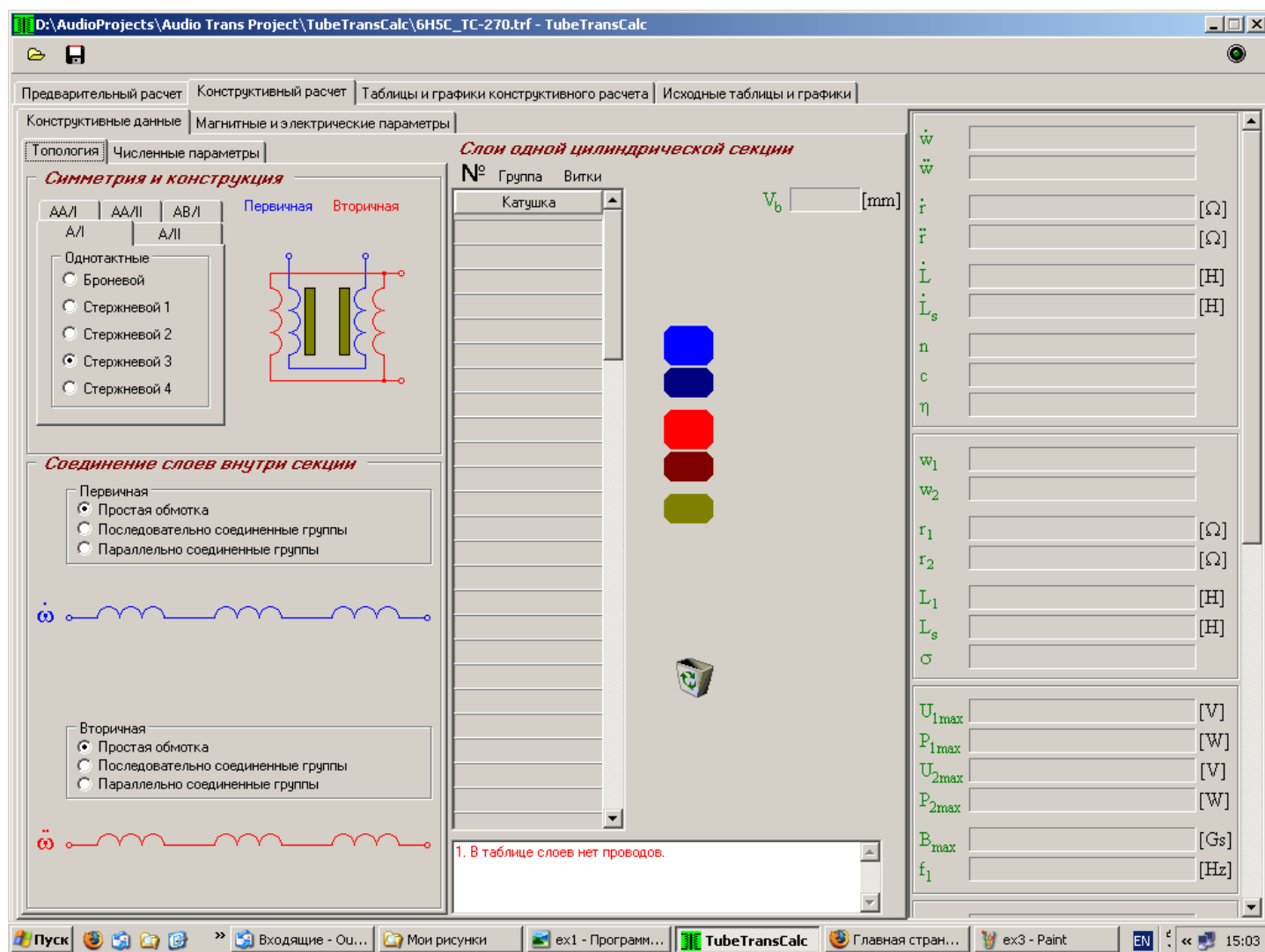
$d_1$  0,50964569083114 [mm]  
 $d_2$  1,12508221621202 [mm]  
 $I_0$  115 [mA]  
 $\Delta$  0,121868976591884 [mm]

$R_k$  [ $\Omega$ ]  
 $C_k$  [ $\mu F$ ]

Пуск | Входные - Оу... | Мои рисунки | ex1 - Програм... | TubeTransCalc | Главная стран... | ex1 - Paint | EN | 14:47

и  $d_1 = 0,5 \text{ mm}$  (диаметр провода первичной обмотки), так как они дают хоть какое-то представление о том, с чего начинать виртуальную намотку трансформатора на странице “Конструктивный расчет”.

Действия на этой странице программы начинаем с задания топологии, основной смысл которой пока совпадает со смыслом вкладки “Симметрия и конструкция” на странице “Предварительный расчет”.



Ввод параметров продолжим на вкладке “Магнитные и электрические параметры”, являющейся частью страницы “Конструктивный расчет”.

Предварительный расчет | Конструктивный расчет | Таблицы и графики конструктивного расчета | Исходные таблицы и графики

Конструктивные данные | Магнитные и электрические параметры

**1. Тип нагрузки**

Без корректирующей цепочки

Активная ☒ Индуктивная

$L_s$  [H]  $L_s$  [H]  $R_k$  [Ω]  $C_k$  [uF]

$L_2$  [mH]

**2. Согласование импедансов**

Вариант ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☒ 3

$R_{in}$  [Ω]  $R_i$  225 [Ω]  $R_{out}$  [Ω]  $R_2$  4 [Ω]

**3. Мощность сигнала, нижняя рабочая частота и допустимая индукция**

☒ Частота и Напряжение ☐ Индукция и Напряжение ☐ Частота и Индукция

$f_1$  0 [Hz]

И

$U_{1max}$  Не задано [V]  $P_{1max}$  0,000 [W]  $U_{2max}$  Не задано [V]  $P_{2max}$  Не задано [W]

**4. Магнитная проницаемость**

Без подмагничивания | С подмагничиванием

$I_0$  Не задано [mA]  $\Delta$  0,00 [mm]

$a\omega_0$   $\mu_A(a\omega_0)$  500

$\dot{w}$   $\ddot{w}$   $\dot{r}$   $\ddot{r}$   $\dot{L}$   $\ddot{L}_s$   $n$   $c$   $\eta$   $w_1$   $w_2$   $r_1$   $r_2$   $L_1$   $L_s$   $\sigma$   $U_{1max}$   $P_{1max}$   $U_{2max}$   $P_{2max}$   $B_{max}$   $f_1$

Здесь задаем внутреннее сопротивление нашей пары триодов (в одном баллоне) SV6AS7 –  $225\Omega$ , и импеданс акустической системы ( $4\Omega$ ). Такое же значение  $R_2$  я задавал и в предварительном расчете. Этот момент требует пояснений. Мои акустические системы Таппоу по паспорту имеют импеданс  $6\Omega$ , а на нижней частоте он опускается до  $2\Omega$ . В соответствии с рекомендацией Д. Андронникова я принял за основу при расчетах среднюю величину  $4\Omega$ .

Далее переходим на вкладку “Численные параметры“, являющейся частью страницы “Конструктивный расчет”.



Здесь нужно задать материал сердечника (Э310) и выбрать подходящий сердечник. Поскольку сердечника ТС-270 в списке нет, придется обмерить штангенциркулем сердечник, катушку и ввести данные вручную. У меня в гараже была катушка провода, который после замера диаметра без изоляции дал значение 0,57mm, а использование также результата замера диаметра с изоляцией дало возможность по таблице проводов на странице “Исходные таблицы и графики” определить его как “ПЭЛ, ПЭТ”. В каждом слое катушки от щечки до щечки по расчетам (программы) можно было поместить 153 витка провода. Однако мой небольшой опыт подсказал, что лучше ограничиться значением 120. (Так впоследствии и оказалось.)

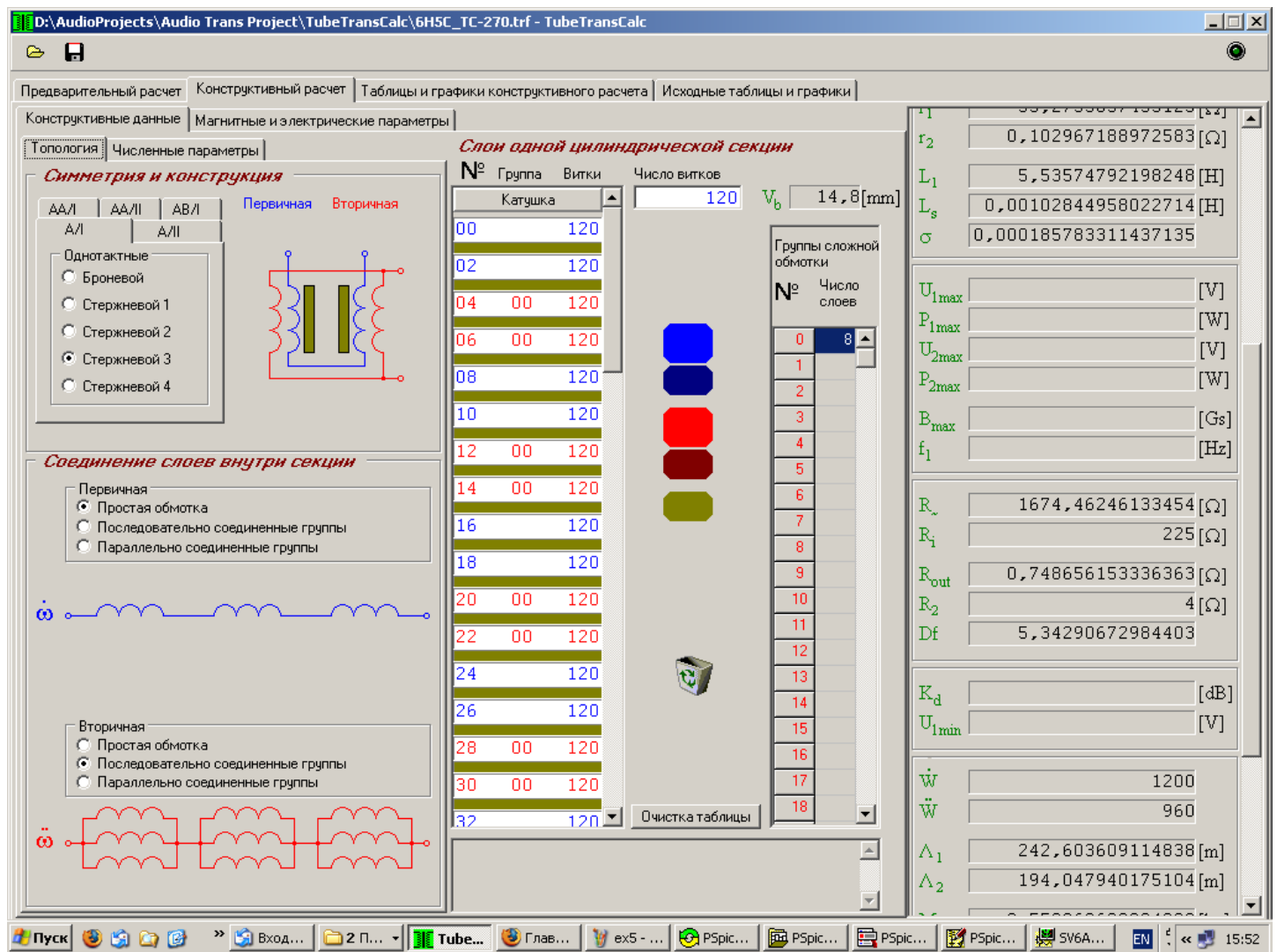
Здесь сразу же я ввел толщину межслоевой прокладки – 0,07mm. Это как раз толщина тетрадного листа в клеточку (тетрадные листы в линейку и в косую линейку я не обмерял).

Данная страница предоставляет возможность заполнить таблицу слоев. Первым я положил в таблицу единственный слой вторичной обмотки, а после него 9 слоев первичной обмотки. Один слой вторичной обмотки в совокупности с первичной обмоткой дает старт внутренним процедурам расчета, а 9 слоев первички позволяют увидеть, что это уже близко к вожеленному значению  $R_{\Sigma}=1600\Omega$ .

Теперь все остальное сводится к уточнению числа слоев первичной и вторичной обмоток, а так же способа их чередования. (Только не забывайте, что таблица показывает **одну** катушку трансформатора, а наматывать придется **две** такие катушки.)

Вот результат некоторого колдовства со слоями:





Здесь всего 10 слоев первичной и 8 слоев вторичной обмотки, сгруппированных по 2. На вкладке “Топология” вторичная обмотка показана как “Последовательно соединенные группы”, а в таблице слоев всем слоям вторичной обмотки присвоен номер 0. Это значит, что после намотки мы должны будем спаять параллельно все слои вторички в каждой катушке (а потом спаять параллельно и обе катушки). Аналогично слои первички каждой катушки (а так же и обмотки на катушках) нам придется соединить последовательно.

Как видно на правой панели с расчетными параметрами, нами достигнут главный результат – импеданс первички  $R_{\omega} = 1674 \Omega$ .

Возвращаясь на вкладку “Магнитные и электрические параметры”,

Диск: D:\AudioProjects\Audio Trans Project\TubeTransCalc\6H5C\_TC-270.trf - TubeTransCalc

Предварительный расчет | Конструктивный расчет | Таблицы и графики конструктивного расчета | Исходные таблицы и графики

Конструктивные данные | Магнитные и электрические параметры

### 1. Тип нагрузки

Без корректирующей цепочки

☒ Активная

☐ Индуктивная

$L_s$  [H]

С корректирующей цепочкой

$L_s$  [H]

$R_k$  [Ω]

$C_k$  [uF]

$L_2$  [mH]

### 2. Согласование импедансов

Вариант ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☒ 3

$R_{in}$  [Ω]  $R_i$  225 [Ω]

$R_{out}$  [Ω]  $R_2$  4 [Ω]

### 3. Мощность сигнала, нижняя рабочая частота и допустимая индукция

☐ Частота и Напряжение ☒ Индукция и Напряжение ☐ Частота и Индукция

$B_{adm}$  7000 [Gs]

ИЛИ

$U_{1max}$  165,000 [V]

$P_{1max}$  Не задано [W]

$U_{2max}$  Не задано [V]

$P_{2max}$  Не задано [W]

### 4. Магнитная проницаемость

☐ Без подмагничивания ☐ С подмагничиванием

$I_0$  Не задано [mA]

ИЛИ

$\Delta$  0,00 [mm]

$a\omega_0$

$\mu_A(a\omega_0)$  500

Параметры:

$r_1$  0,002733337 100128 [Ω]

$r_2$  0,102967188972583 [Ω]

$L_1$  11,5260490301365 [H]

$L_s$  0,00102844958022714 [H]

$\sigma$  8,92282843442813E-5

$U_{1max}$  165 [V]

$P_{1max}$  8,12947457129069 [W]

$U_{2max}$  6,94933449262577 [V]

$P_{2max}$  7,76796113046237 [W]

$B_{max}$  7000 [Gs]

$f_1$  15,1046611894038 [Hz]

$R_{in}$  1674,46246133454 [Ω]

$R_i$  225 [Ω]

$R_{out}$  0,748656153336363 [Ω]

$R_2$  4 [Ω]

$Df$  5,34290672984403

$K_d$  [dB]

$U_{1min}$  [V]

$\dot{W}$  1200

$\ddot{W}$  960

$\Lambda_1$  242,603609114838 [m]

$\Lambda_2$  194,047940175104 [m]

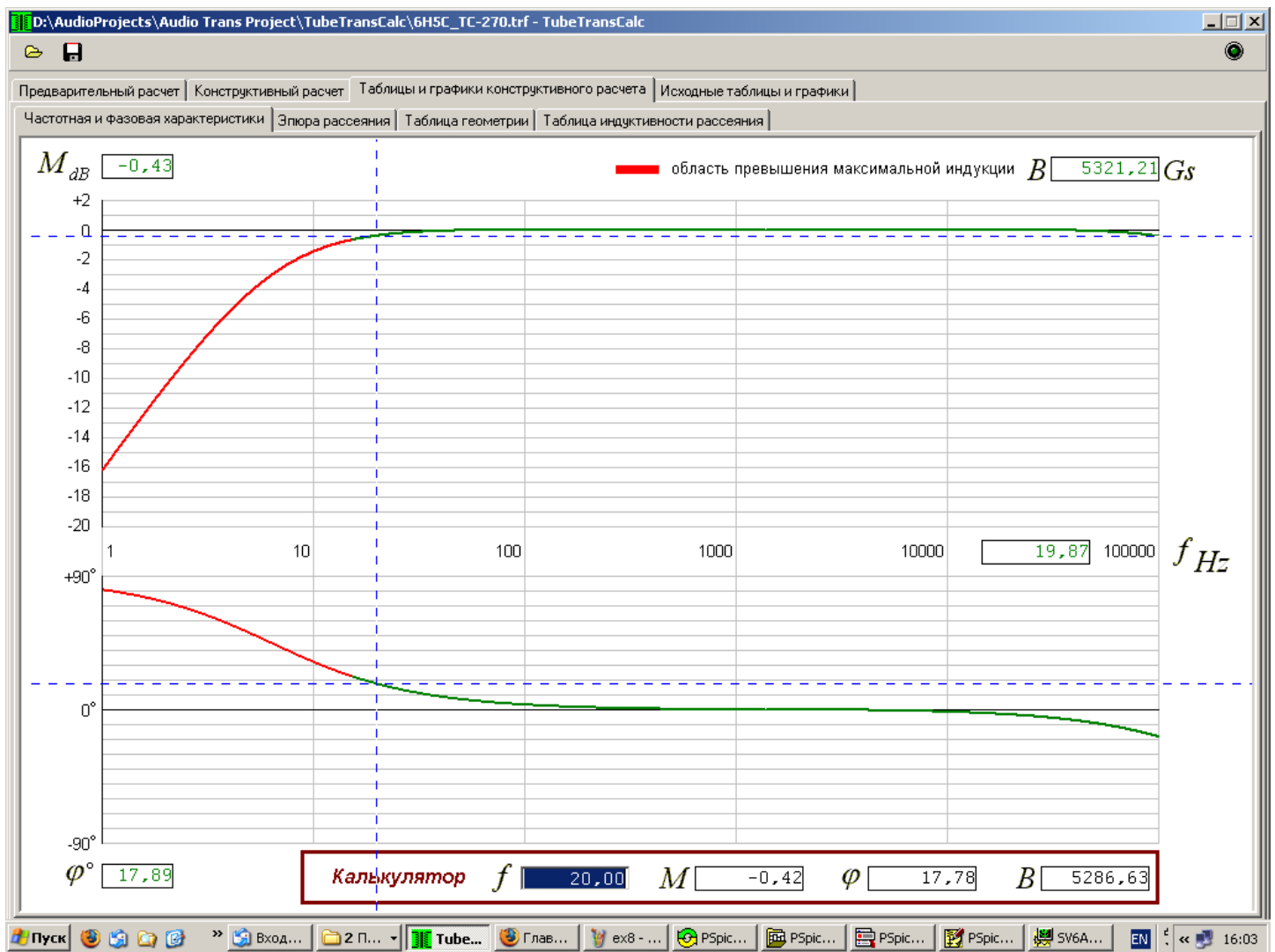
Пуск | Вход... | 2 П... | Tube... | Глав... | ex6 - ... | PSpic... | PSpic... | PSpic... | PSpic... | SV6A... | EN | 15:59

вводим максимальную индукцию 7000Gs на нижней частоте и расчетное (помните Pspice?) напряжение 165V. Правая панель с параметрами немедленно дает ответ, что введенная индукция будет иметь место на частоте 15Гц при мощности в акустической системе примерно 7,8W. Хотя мои Tannoу ниже чем 30Гц не звучат но, по крайней мере, на низах хрюкать не будут...

Теперь на той же вкладке зададим расчетный постоянный ток в нагрузке каскада (т.е. в первичной обмотке трансформатора) – 115mA.

Декабрь 2005 г.

Настало время, не обращая внимания на всякие там индуктивности и коэффициенты рассеяния, посмотреть на частотную характеристику:



Из нее следует, что на частоте 20 Гц мы будем иметь спад частотной характеристики  $-0.42$  dB, индукцию чуть больше 5000 Гс и угол поворота фазы примерно 18 град. Эти параметры вполне вписываются в самые жесткие ограничения. По этому поводу Herb Reichert писал следующее: “Я уверен — ультразвуковое и инфразвуковое поведение SE-усилителя должно быть тщательно изучено. Чрезмерный набег фаз или звон в этих областях могут наверняка скомпрометировать силовой потенциал усилителя. Если выходной трансформатор на частоте 100 Гц поворачивает фазу более чем на 40 градусов, то усилитель будет звучать тихо и покажется, что бас задвинут, испытывая недостаток в мелодичности. Низкочастотные излучатели басов будут звучать скучно. Подобно тому, что если в ультразвуковом диапазоне наблюдается звон, усилитель будет звучать тяжело и глухо”. Я не могу сказать пока за весь усилитель в целом, но звучать тупо из-за потерь на верхах за счет повышенной индуктивности рассеяния он не должен — график не позволяет.

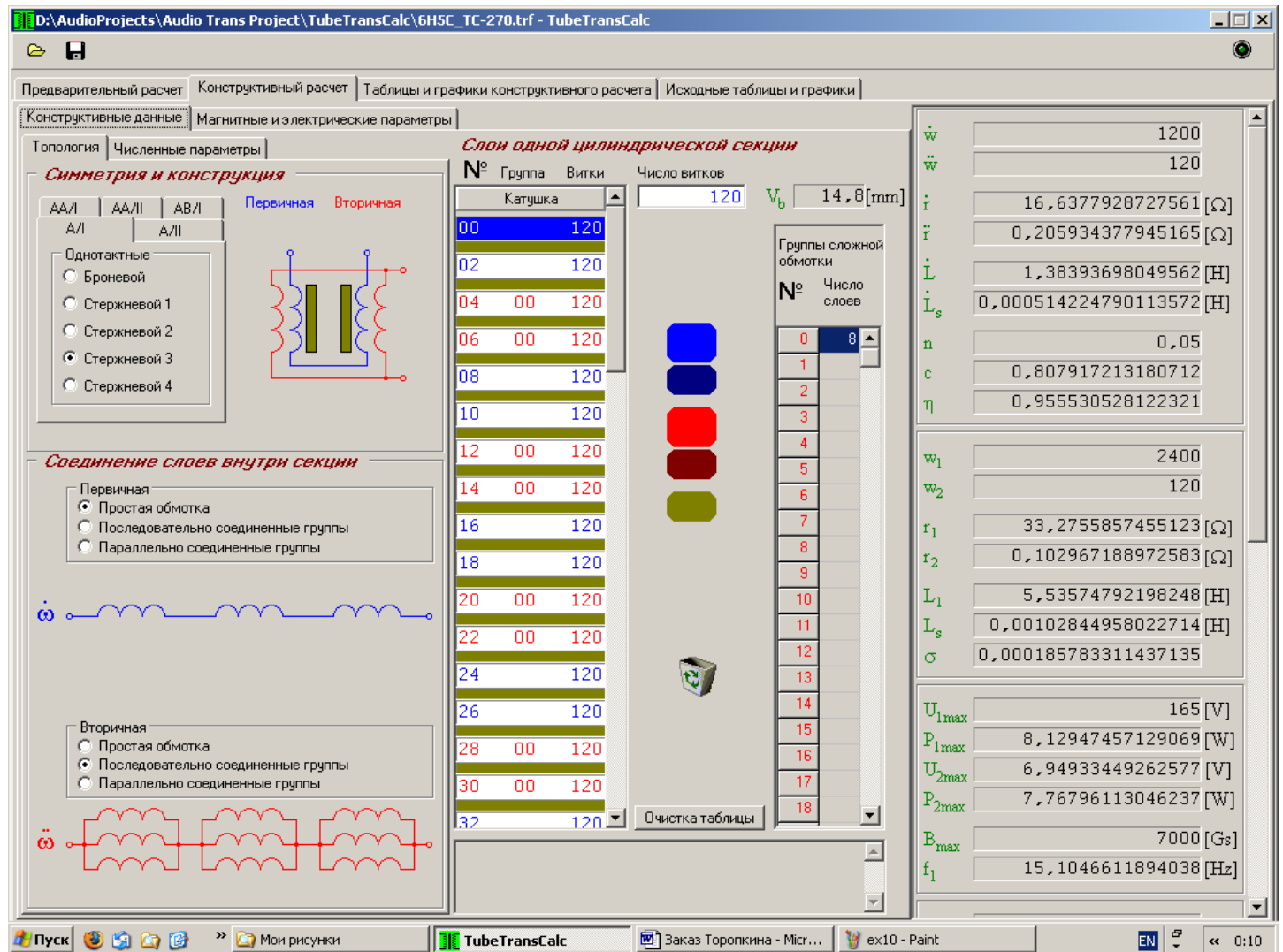
При намотке трансформатора я пропитывал (промазывал) каждый слой электротехническим лаком, а затем просушивал катушки при температуре 110 градусов в течение 10 часов. Такой подход обеспечивает хорошую электрическую прочность обмоток, но способствует увеличению емкости трансформатора. По вопросам емкости трансформаторов рекомендую читать монографию Г.С. Цыкина “Трансформаторы низкой частоты” 1955 г. издания.

### *TransCalc и Pspice – вторая серия*

Вторая часть этого повествования была написана спустя два дня. После написания первой части я, как Господь Бог, решил насладиться созерцанием своего пупка. Этот важный процесс на сей раз выражался во внимательном прочтении мной написанного. Я отметил для себя, что там есть вещь несколько невнятно изложенная. А именно — вопрос выбора в “Конструктивном расчете” способа соединения секций одной и той же обмотки в катушке трансформатора (в данном случае это секции вторичной обмотки; сколько катушек — одна на броне сердечнике или две на стержневом — не имеет значения). С этой

целью я сравнил свое описание и реально намотанный трансформатор с уже спаянными секциями. И к своему ужасу обнаружил, что все не так. Здесь я хочу успокоить читателя. Описание действительно соответствует поставленной цели – представить внутренне непротиворечивый проект PSE-каскада на лампе 6Н5С. Но лично себя я обманул. Мой реальный трансформатор на самом деле оказался совершенно другим. Однако я счел это хорошим поводом продолжить повествование и показать упорному и настойчивому читателю на моем примере, что даже в таком сложном деле, как проектирование окончного каскада усилителя, иногда можно извлечь пользу из поражения.

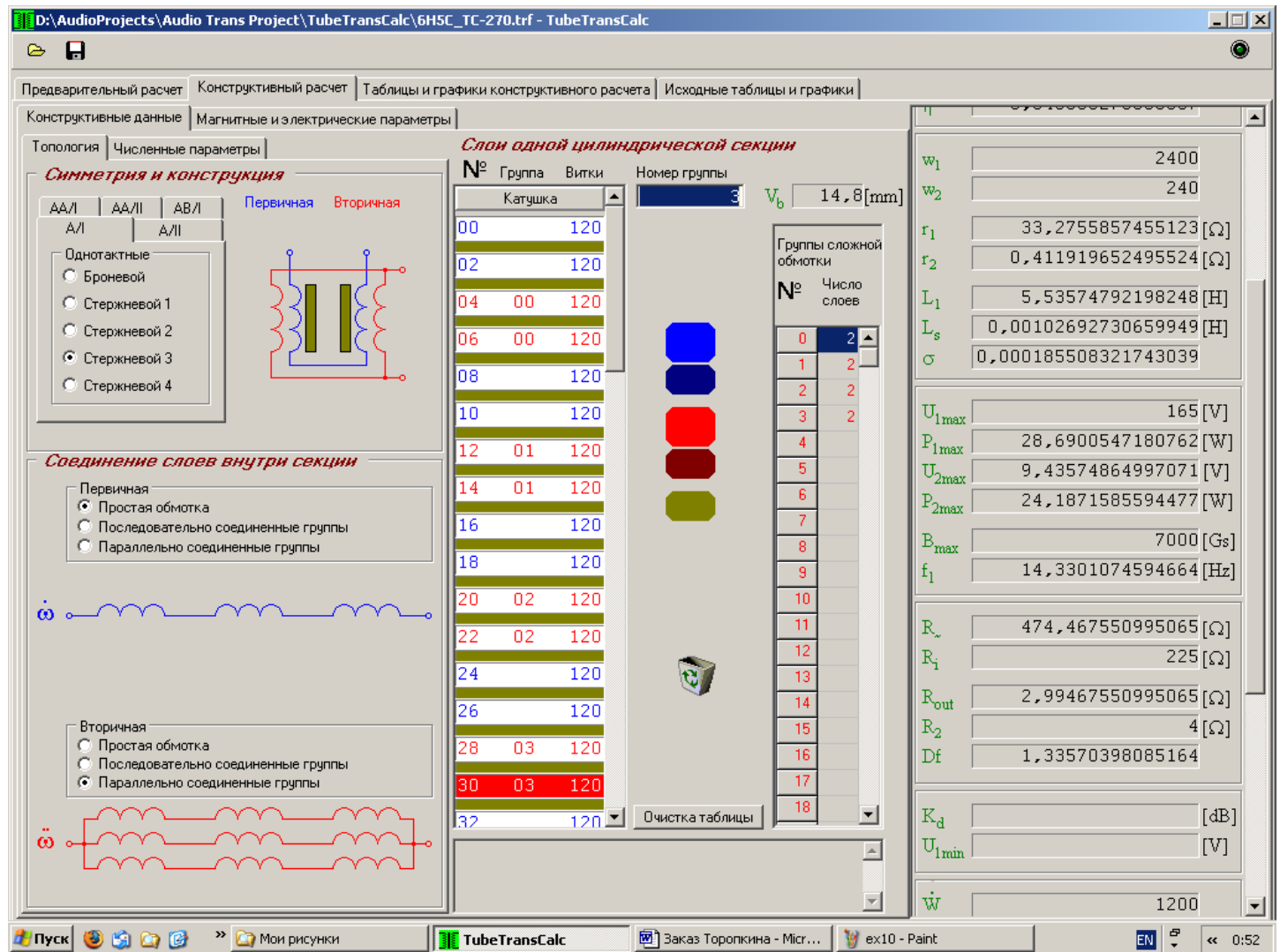
Итак – в чем ошибка? Как вы помните, я сообщил программе Tube TransCalc, что секции вторичной обмотки в катушке я собираюсь соединить параллельно. С этой целью я установил на панели "Топология" радиогруппу "Вторичная" в состояние "Последовательно соединенные группы".



Что такое "группа"? Группа – это совокупность всех слоев вторичной обмотки, которые имеют одинаковый номер группы. В данном случае всем слоям вторичной обмотки присвоен номер 0, следовательно все они принадлежат к одной и той же группе. На левой панели показаны три последовательно соединенные группы, каждая из трех слоев. Не имеет значения, сколько слоев в группе – три (как на рисунке) – или восемь (как в катушке). Точно так же не имеет значения, сколько групп соединены последовательно – три (как на рисунке) – или одна (в нашей катушке). Смысл один и тот же. Это видно из того, что параллельно соединенные слои по 120 витков каждый в итоге дают 120 витков на одной катушке и 120 витков во всем трансформаторе (на правой панели, где представлены все расчетные параметры трансформатора).

Когда я мотал трансформатор, то каждую секцию, состоящую из двух соседних слоев на одной и той же катушке, я наматывал цельным куском провода (для избежания ненужных паяк). Такой прием оказался совершенно логичным для первичной обмотки но, как выяснилось, нелогичным для вторичной. В итоге я получил на катушке четыре секции вторички – каждая по два последовательно соединенных слоя. Эти

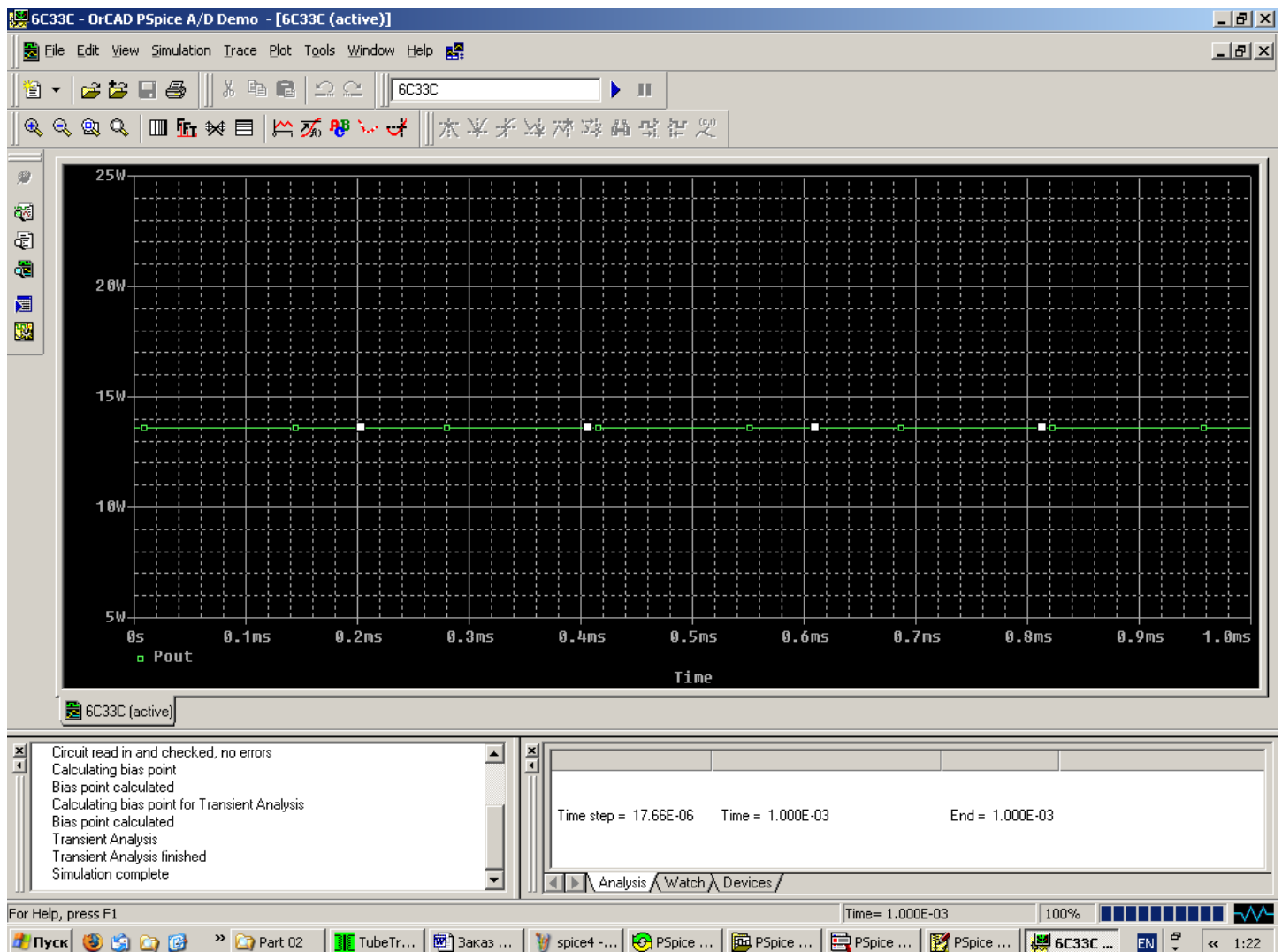
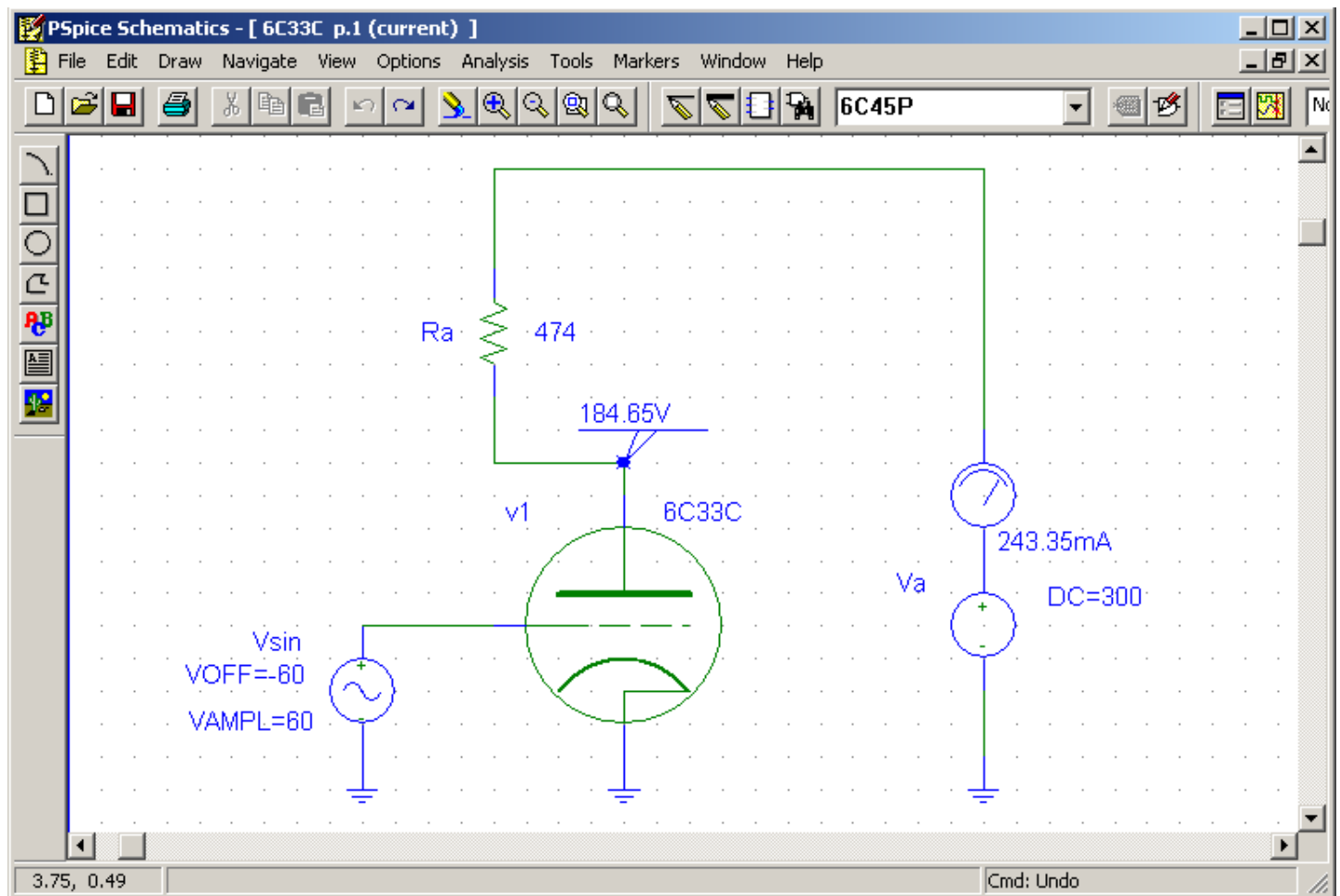
четыре секции на каждой катушке я впоследствии соединил параллельно. Вот результат моего творчества с точки зрения Tube TransCalc:



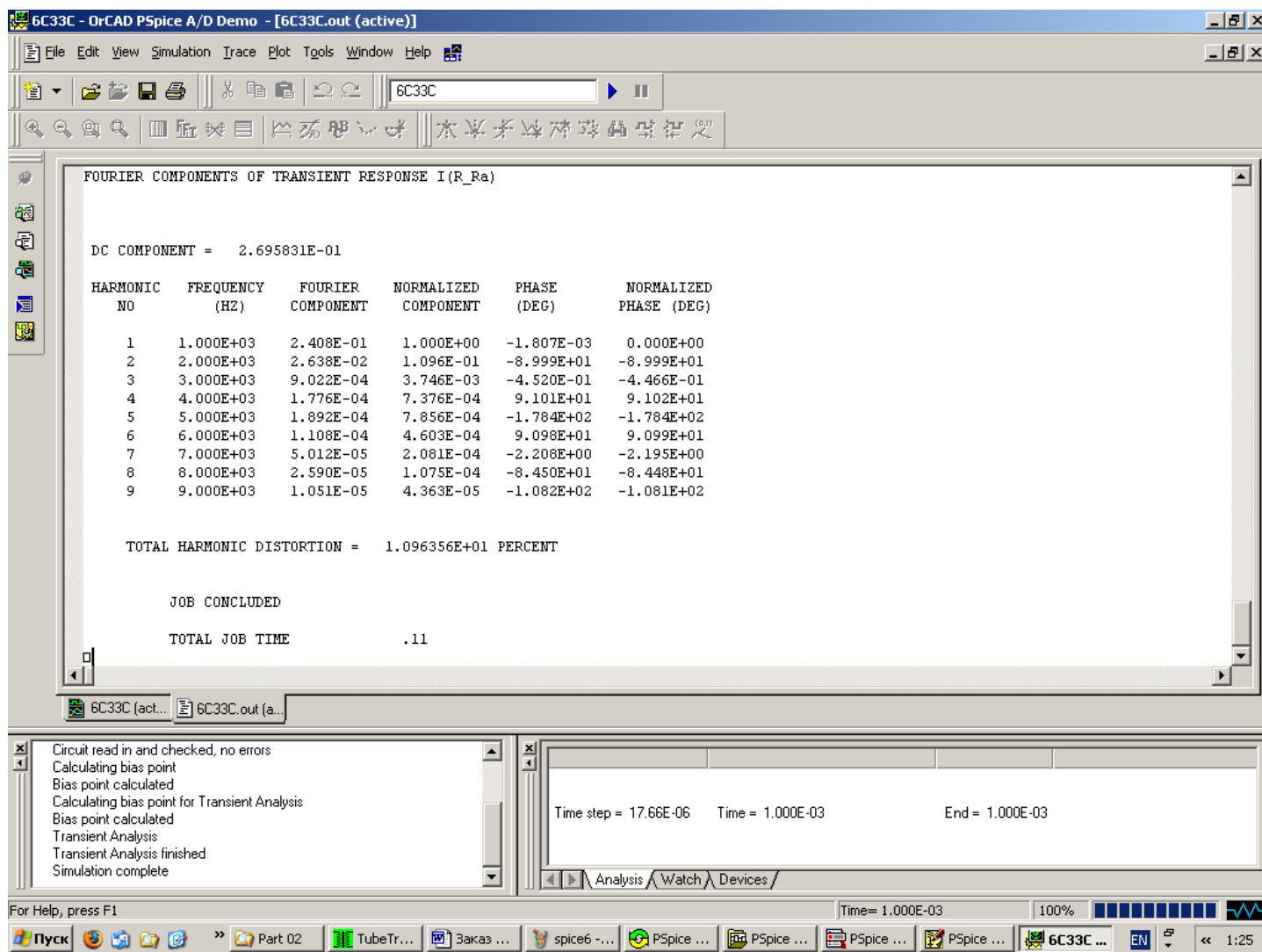
Не меняя численных параметров, я всего лишь изменил топологию вторичной обмотки на “Последовательно соединенные группы”, и присвоил всем четырем группам разные номера (от 0 до 3). Мой ужас начался когда я увидел, что импеданс первичной обмотки упал до значения  $R_{\sim}=474\Omega$ . С таким трансформатором к 6Н5С даже не подходит...

Оставалось только делить это число на внутренние сопротивления всех известных мне ламп. И когда я произвел вычисление  $474:130=3.64...$  то понял, что еще не все потеряно. Ведь  $130\Omega$  – это внутреннее сопротивление 6С33С. Теперь настала очередь PSpice Student.

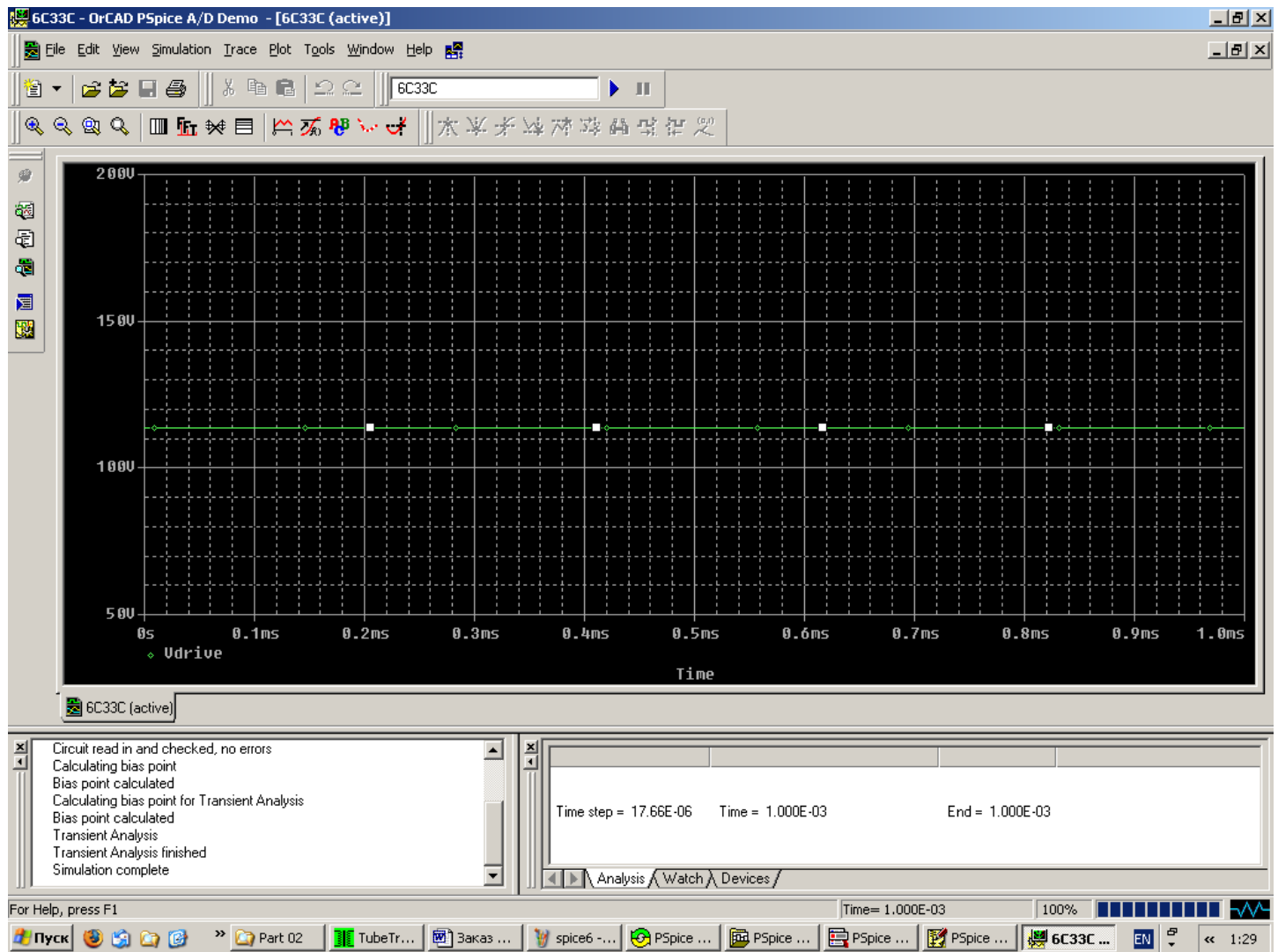




Мощность в нагрузке вполне приличная – 14,6W. И коэффициент гармоник радует:



Всего 1%. Ну просто сказка! А что там с переменным напряжением на концах нагрузки?



...всего 114V. Слышишь, TransCalc? Есть работа.

Мне осталось уточнить сопротивление лампы, напряжение на концах первичной обмотки и толщину немагнитной прокладки. Вот что получилось:

The screenshot shows the 'TubeTransCalc' software window. The main tabs are 'Предварительный расчет', 'Конструктивный расчет', 'Таблицы и графики конструктивного расчета', and 'Исходные таблицы и графики'. The 'Конструктивный расчет' tab is active, with sub-tabs for 'Конструктивные данные' and 'Магнитные и электрические параметры'. The 'Конструктивные данные' sub-tab is selected, showing four sections: 1. Тип нагрузки (Active/Inductive), 2. Согласование импедансов (Impedance matching), 3. Мощность сигнала, нижняя рабочая частота и допустимая индукция (Signal power, lower operating frequency, and permissible induction), and 4. Магнитная проницаемость (Magnetic permeability). The right side of the window displays a list of calculated parameters including  $\dot{w}$ ,  $\ddot{w}$ ,  $\dot{r}$ ,  $\ddot{r}$ ,  $\dot{L}$ ,  $\ddot{L}_s$ ,  $n$ ,  $c$ ,  $\eta$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $L_1$ ,  $L_s$ ,  $\sigma$ ,  $U_{1max}$ ,  $P_{1max}$ ,  $U_{2max}$ ,  $P_{2max}$ ,  $B_{max}$ , and  $f_1$ . The bottom status bar shows the file path 'D:\AudioProjects\Audio Trans Project\TubeTransCalc\6C33C\_TC-270.trf' and the window title 'TubeTransCalc'.

Итак, я буду иметь на входе акустической системы 11,5W при 7000Gs, и это все на частоте меньше 10Гц! Вот если бы и коэффициент гармоник был такой, как обещал PSpice... Ну да Бог с ним. Не все коту масленица. Кстати – во вторичной обмотке трансформатора уже не 120, а 240 витков. Число витков увеличилось в два раза, а  $R_{\text{out}}$  уменьшилось со значения 1674Ω до 474Ω – то есть в 4 раза. По упрощенной теории, так как  $2^2 = 4$ , то должно быть 1674:4=418,5Ω. Откуда же взялось 474? Дело в том, что в образовании значения  $R_{\text{out}}$  кроме коэффициента трансформации так же принимают участие активные сопротивления обмоток и сопротивление нагрузки. А у нас с увеличением числа витков вторичной обмотки ее сопротивление чуточку выросло. Но это уже другая история...

### ...а как сделать еще лучше?

Посмотрим для начала на частотную характеристику последнего варианта:

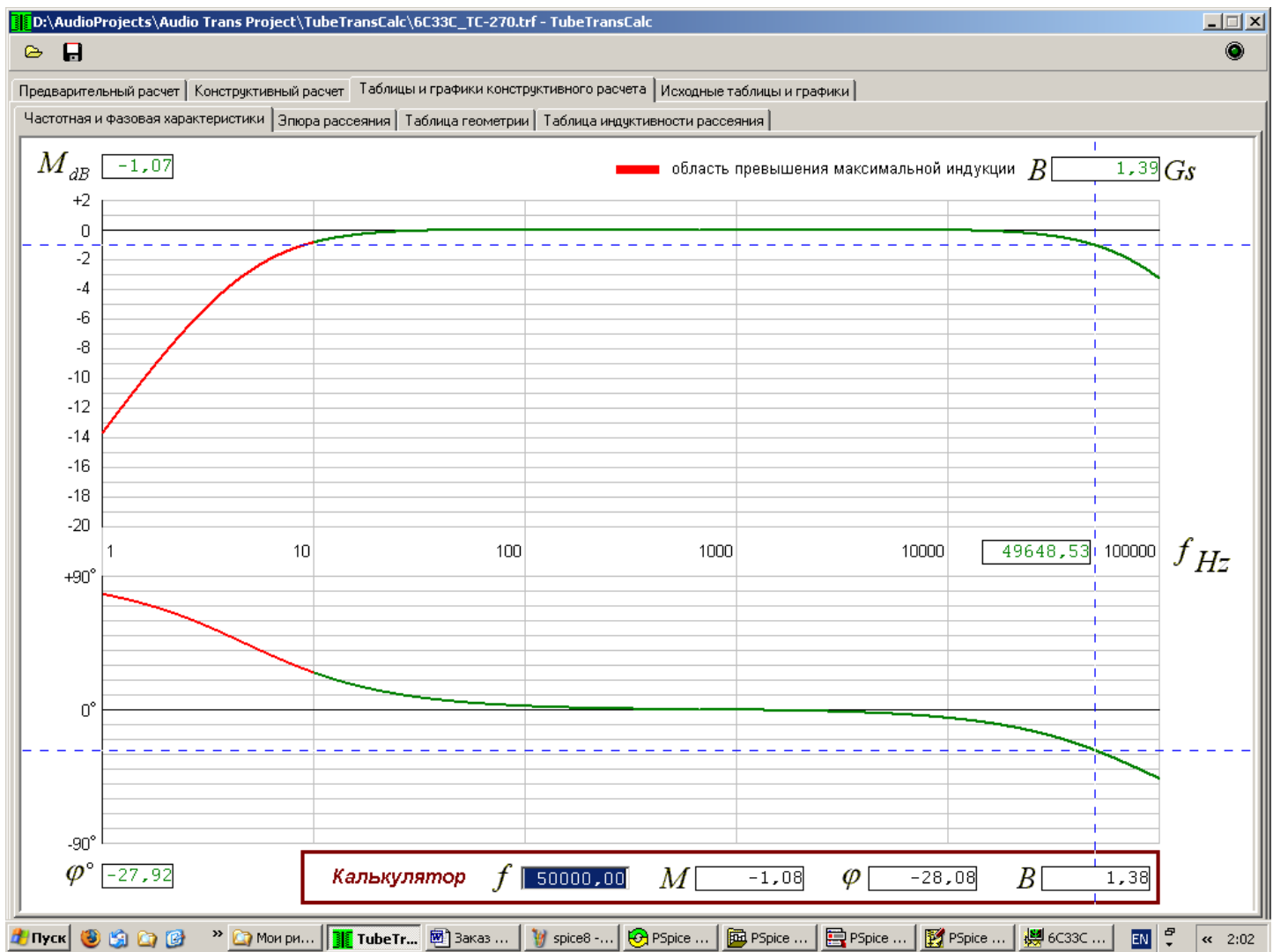


График показывает, что на частотах 10Гц и 50КГц спад частотной характеристики лучше некуда – всего -1Db. Конечно – на частоте 100КГц он уже -3Db. Но кто видел это на экране осциллографа в усилителе, которого еще нет? Лично я не стал перематывать готовые трансформаторы в погоне за призрачным идеалом. Поэтому предлагаю Вам всего лишь посмотреть на другой вариант проекта. Моя идея проста – поскольку на нижних частотах трансформатор и так ведет себя чудесно, то можно слегка там картину ухудшить, но за счет этого улучшить ее на верхах. Если я уберу по одному слою из крайних секций первичной обмотки:

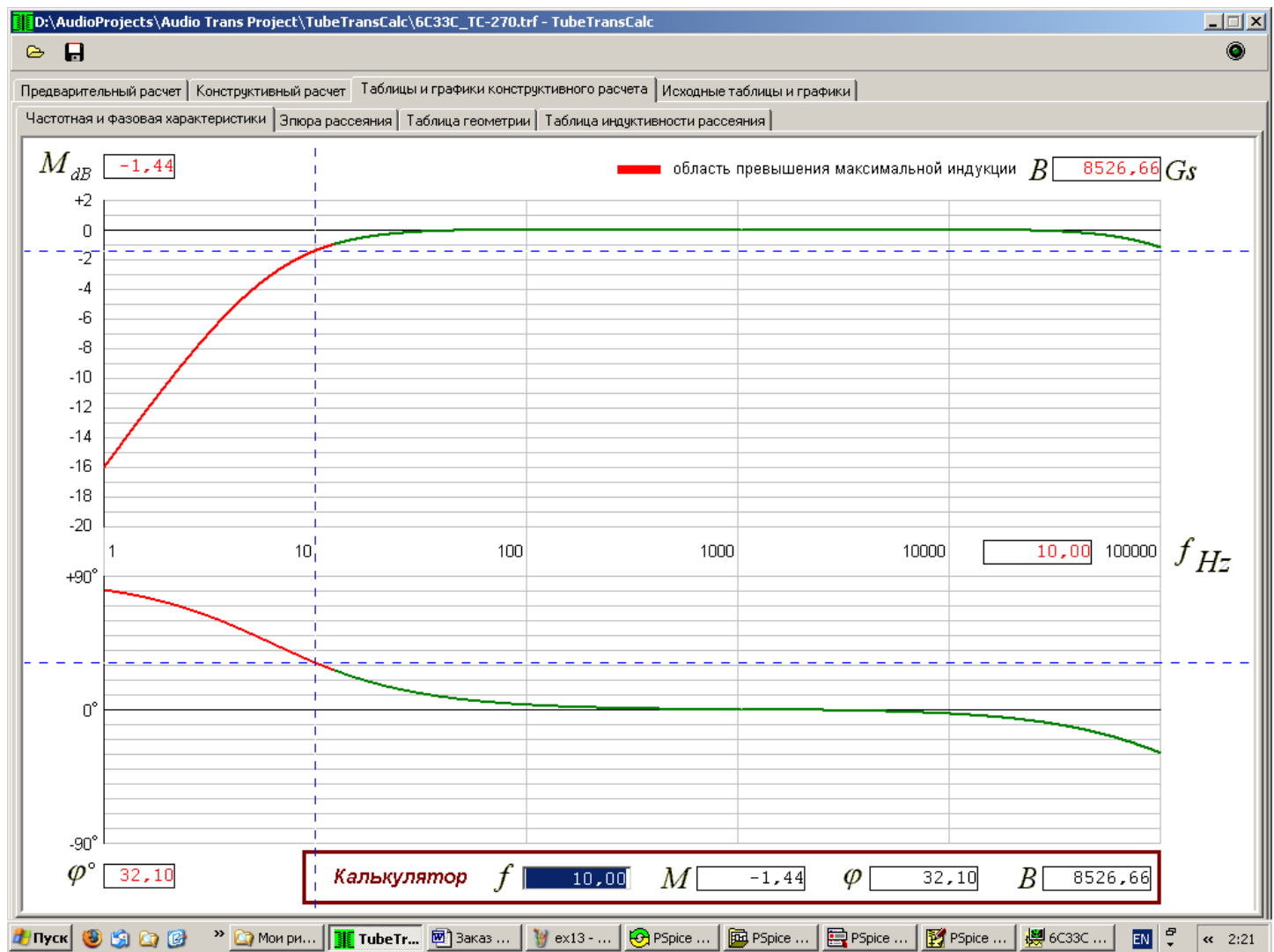
The screenshot shows the TubeTransCalc software interface. The main window displays the 'Конструктивный расчет' (Structural calculation) tab. The 'Симметрия и конструкция' (Symmetry and construction) section shows the 'Первичная' (Primary) and 'Вторичная' (Secondary) winding configurations. The 'Соединение слоев внутри секции' (Layer connection within the section) section shows the 'Первичная' (Primary) and 'Вторичная' (Secondary) winding connections. The 'Слой одной цилиндрической секции' (Layer of one cylindrical section) table shows the number of turns for each layer.

№	Группа	Витки	Число витков
02		120	
04	00	120	
06	00	120	
08		120	
10		120	
12	01	120	
14	01	120	
16		120	
18		120	
20	02	120	
22	02	120	
24		120	
26		120	
28	03	120	
30	03	120	
32		120	

The right panel shows the 'Исходные таблицы и графики' (Initial tables and graphs) section, which contains various parameters and calculated values:

- $L$ : 0,637120428210281 [H]
- $\dot{L}_s$ : 0,000199342233926574 [H]
- $n$ : 0,125
- $c$ : 1,00996949026318
- $\eta$ : 0,831261625642319
- $w_1$ : 1920
- $w_2$ : 240
- $r_1$ : 26,1116841127514 [ $\Omega$ ]
- $r_2$ : 0,403967712089426 [ $\Omega$ ]
- $L_1$ : 2,54848171284113 [H]
- $L_s$ : 0,000398684467853148 [H]
- $\sigma$ : 0,000156439995564529
- $U_{1max}$ : 114 [V]
- $P_{1max}$ : 21,0997579821242 [W]
- $U_{2max}$ : 8,32942096977915 [V]
- $P_{2max}$ : 17,5394191208801 [W]
- $B_{max}$ : 7000 [Gs]
- $f_1$ : 12,1809498705251 [Hz]
- $R_{\omega}$ : 307,965617686475 [ $\Omega$ ]
- $R_1$ : 130 [ $\Omega$ ]
- $R_{out}$ : 2,84321277635117 [ $\Omega$ ]
- $R_2$ : 4 [ $\Omega$ ]
- $Df$ : 1,40685918172237

то ее индуктивность уменьшится и спад на частоте 10Гц вырастет до -1,44Db. Но за счет уменьшения толщины крайних секций в полном соответствии с учением Цыкина улучшится эпюра рассеяния и сама индуктивность рассеяния станет меньше. Это можно видеть на графике: спад характеристики на частоте 100КГц уже не -3Db, а -1Db. Вам нравится? Дерзайте!



Вот только при прежнем значении  $U_{1\max} = 114\text{V}$  почему-то мощность в первичной обмотке выросла до 21W. Но кто сказал, что при уменьшении нагрузки в анодной цепи лампы размах напряжения на концах этой нагрузки останется прежним? Так что пора Вам снова возвращаться к Pspice. Ну а я лучше пойду на базар. Ведь теперь нужно искать 6C33C...