

# Параметрический синтез

## схемы управления ключевого стабилизатора напряжения

**Применение пакетов PSpice (многовариантного анализа) и PSpice Optimizer системы OrCAD позволяет в ряде случаев существенно облегчить схемотехническое проектирование электронных устройств, в том числе ключевых источников питания. В статье рассмотрен пример использования пакетов MathCAD, PSpice и PSpice Optimizer для расчета номиналов компонентов схемы управления ключевого стабилизатора напряжения.**

**Игорь Недолужко,**  
к. т. н.

NedoluzhkolG@mpei.ru

**Дмитрий Каюков**

kajukov@mail.ru

Расчет номиналов компонентов электронных схем по заданным внешним характеристикам и параметрам (параметрический синтез) обычно производится в математической системе, например в MathCAD [1]. При этом необходимо составить математическую модель устройства, что нередко связано с громоздкими и обычно приближенными расчетами. После такого расчета необходимо проверочное моделирование схемы с применением более точных моделей, что, как правило, выполняется с помощью пакета программ PSpice [2] и не требует составления математической модели. В PSpice предусмотрена возможность проведения многовариантного анализа (моделирования) при изменении одного или нескольких параметров. Если при параметрическом синтезе схемы число искоемых параметров невелико, то в многовариантном моделировании схемы при заданном изменении искоемых параметров можно выбрать подходящие значения этих параметров. Еще большими возможностями обладает пакет PSpice Optimizer [2], в котором изменение параметров происходит автоматически, так чтобы моделируемые внешние характеристики (или параметры) приближались к заданным.

В настоящей статье рассматривается пример применения пакетов MathCAD, PSpice и PSpice Optimizer для параметрического синтеза схемы управления (СУ) ключевого стабилизатора напряжения (КСН).

Демонстрационный макет ключевого источника питания (КИП) фирмы Infineon описан в [3]. Макет с выходной мощностью до 200 Вт состоит из корректора коэффициента мощности (ККМ), КСН и СУ на основе интегральной схемы (ИС) контроллера типа TDA16888 [4]. Анализ, усредненная модель и параметрический синтез схемы управления корректора коэффициента мощности этого КИП с помощью MathCAD рассмотрены в работе [5].

Теперь проведем моделирование КСН и расчет его СУ. Упрощенная схема КСН показана на рис. 1. Силовая часть выполнена на прямоходовом двухтранзисторном одноканальном преобразователе напряжения с двумя выходами: нестабилизированным на 12 В (до 8 А) и стабилизированным на 5 В (до 20 А). Для уменьшения потерь выпрямитель низковольтного выхода выполнен на МДП-транзисторах (синхронный выпрямитель). Рассмотрим

работу КСН по этому выходу. Сигнал, пропорциональный току силовых транзисторов, снимается с R15 и через цепочку R32, C21, которая сглаживает начальный паразитный выброс напряжения, подается на вход быстродействующего усилителя (с коэффициентом усиления  $K_u = 5$ ) контроллера (вывод 11). Усиленный сигнал повышается на  $V_v = 1,5$  В и поступает на интегрирующую цепочку R1, C13. Одновременно на выводе 15 формируется пилообразное напряжение. В данном КИП стабилизируется напряжение на выходе 5 В. Сигнал с этого выхода через делитель R19, R20 подается на вход ИС2 (управляемый стабилизатор). В этой ИС2 выходной ток (втекающей полярности) пропорционален разности входного напряжения и напряжения ее опоры. В цепи обратной связи ИС2 стоит цепочка частотной коррекции C16, C17, R21, обеспечивающая устойчивость КСН. Для гальванической развязки входной и выходной частей СУ служит оптрон ИС3. Ток на его выходе, пропорциональный выходному току ИС2, подается на делитель R23, R25, который питается от ИОН-контроллера (вывод 2). Полученный сигнал через помехозащищающую цепочку R35, C22 подается на вход компаратора (вывод 14). На второй вход компаратора подается напряжение пилообразное (вывод 15). В момент сравнения этих напряжений срабатывает компаратор 8 и заканчивается отпирающий импульс на выходе драйвера (формируется относительное время включенного состояния ключей — коэффициент заполнения). Максимальное значение коэффициента заполнения выходного сигнала СУ стабилизатора равно 0,5.

Параметры компонентов силовой части следующие: входное стабилизированное напряжение питания (выход ККМ)  $V_s = 380$  В, максимальный ток нагрузки  $I_x = 20$  А, коэффициент трансформации силового трансформатора  $N = 0,08$ , индуктивности дросселей выходного фильтра  $L3 = 6$  мкГн,  $L5 = 1$  мкГн, паразитные сопротивления конденсаторов выходного фильтра  $R_c = 0,05$  Ом, общее сопротивление потерь, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора  $R_{on} = 0,05$  Ом, период коммутации  $T = 5$  мкс. Параметры компонентов СУ: оптрон имеет коэффициент передачи по току  $K_{op} = 1$ , параметры ВАХ:  $I_s = 1$  пА,  $V_{dr} = 0,05$  В; ИС TL431: напряжение опоры  $V_r = 2,5$  В, минимальный и максимальный ток катода  $I_{kno} = 0,5$  мА,  $I_{kxo} = 150$  мА, граничная частота

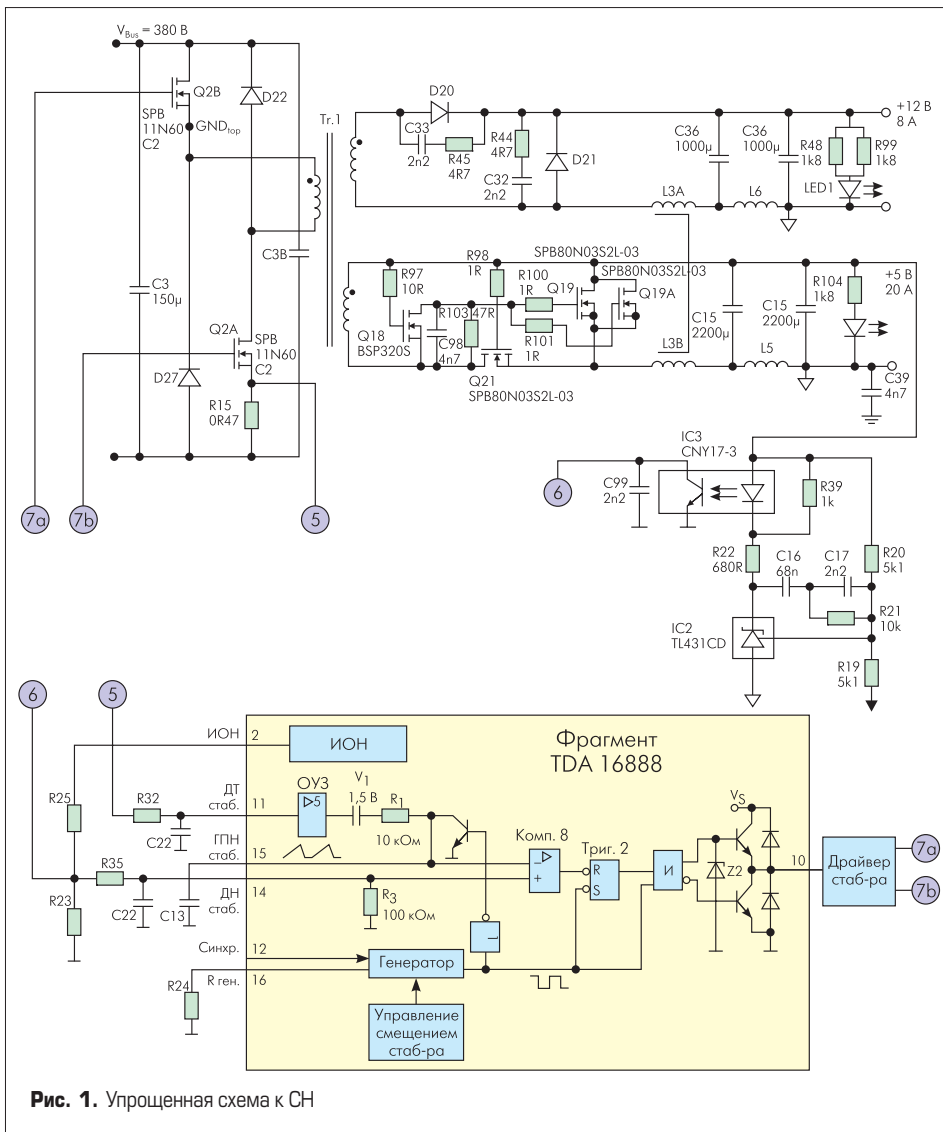


Рис. 1. Упрощенная схема КСН

$F_g = 1\text{кГц}$ , входной ток не более 4 мА; контроллер TDA16888:  $K_u = 5$ ,  $V_v = 1,5\text{ В}$ ,  $V_{ref} = 7,5\text{ В}$ ,  $R_1 = 10\text{ кОм}$ , минимальное и максимальное напряжение на выводе 14  $U_{fbn} = 1,5\text{ В}$ ,  $U_{fbx} = 6,5\text{ В}$ . Напряжение срабатывания токовой защиты  $V_{cs} = 1\text{ В}$ .

Параметры всех сопротивлений и емкостей СУ приведены на схеме. Покажем, как их можно рассчитать, чтобы обеспечить нормальный режим работы всех узлов (ИС) СУ и устойчивость СН ( $R_{21}$ ,  $C_{17}$ ,  $C_{17}$ ). Методика этого расчета может быть полезна при проектировании СУ для силовой части, отличающейся от данной параметрами или схемотехникой.

Зная параметры силовой части, можно рассчитать максимальную амплитуду импульса тока транзисторного ключа  $I_{\Pi a} = 3,2\text{ А}$ , откуда сопротивление датчика тока  $R_{15} = V_{cs}/I_{\Pi a} = 0,3\text{ Ом}$ . Параметры цепочек  $R_{32}, C_{21}$  и  $R_{35}, C_{22}$ , сглаживающих паразитные импульсы, рассчитать трудно. Они подбираются или при имитационном моделировании силовой части, или экспериментально. Выбираем  $R_{32} = R_{35} = 1\text{ кОм}$ ,  $C_{21} = 100\text{ пФ}$ ,  $C_{22} = 4,7\text{ нФ}$  (как в данном макете). Для нормальной работы ИС2 ток делителя  $V_v/R_{19}$  должен быть во много (100) раз больше входного тока ИС2  $I_v = 4\text{ мА}$ , откуда  $R_{19} = 6\text{ кОм}$ , выбираем  $R_{19} = 5,1\text{ кОм}$ . Сопротивление  $R_{20}$  рассчитывается из условия обеспечения номинального выходного напряжения  $U_0 = 5\text{ В}$ :  $U_0 \times R_{19}/(R_{19} + R_{20}) = V_v$ ,

откуда  $R_{20} = 5,1\text{ кОм}$ . Номиналы  $R_{22}$ ,  $R_{39}$ , обеспечивающих нормальные режимы работы ИС2 и ИС3, и номиналы  $R_{23}$ ,  $R_{23}$ , обеспечивающих нормальные режимы работы ИС1, рассчитаем с помощью математической модели (ММ) КСН для установившегося (статического) режима, полученной методом усредненных переменных состояния. Одновременно рассчитаем режимы работы всех узлов КСН для двух крайних значений тока нагрузки  $I_x = 20\text{ А}$  и  $I_n = 1\text{ А}$ . Для этого в системе MathCAD зададим начальные приближения соответственно для коэффициента заполнения  $D_x$ ,  $D_n$ , выходного напряжения  $U_{on}$ ,  $U_{ox}$ , напряжения  $U_{14n}$ ,  $U_{14x}$ , тока катода ИС2  $I_{kn}$ ,  $I_{kx}$ , тока диода ИС3  $I_{dn}$ ,  $I_{dx}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{25}$ ,  $T_c = R_1 \times C_{13}$ , а также функцию для диода оптрона  $U_d(I_d) = V_{d0} \times \ln(1 + I_d/I_s)$ . Далее в блоке Given-Find запишем уравнения для режима  $I_x$ ,  $D_x$ ,  $I_{kn}$ ,  $I_{dn}$ ,  $U_{14x}$  (см. формулы внизу страницы).

$$U_{on} + I_x \times R_{15} \times D_x \times N^2 + I_x \times R_{on} = V_s \times N \times D_x; \quad I_{kn} = \left( U_{on} \times \frac{R_{19}}{R_{19} + R_{20}} - V_v \right) \times S;$$

$$I_{dn} = I_{kn} - \frac{U_d(I_{dn})}{R_{39}}; \quad U_{14x} = V_{ref} \times \frac{R_{23}}{R_{23} + R_{25}} - \frac{R_{23} \times R_{25}}{R_{23} + R_{25}} \times I_{dn} \times K_{op};$$

$$V_v \times \left( 1 - \exp\left( \frac{-D_x \times T}{T_c} \right) \right) + K_u \times R_{15} \times N \times \left[ \left( 1 - \exp\left( \frac{-D_x \times T}{T_c} \right) \right) \times I_x + \frac{V_s \times N - U_{on}}{2 \times L_3} \times D_x \times T \right] = U_{14x};$$

$$U_{14n} > U_{fbn}; \quad I_{kn} > I_{kno}; \quad I_{dn} > 0; \quad V_{ref} \times \frac{R_{23}}{R_{23} + R_{25}} < U_{fbx}; \quad D_x < 0,5.$$

В этом же блоке записываем уравнения для режима  $I_n = 1\text{ А}$ ,  $D_n$ ,  $I_{kn}$ ,  $I_{dx}$ ,  $U_{14n}$  с учетом ограничений в виде неравенств, показанных выше (см. внизу страницы), находим решение для режимов силовой части и СУ, а также значения  $R_{23}$ ,  $R_{25}$ ,  $T_c$ :  $D_x = 0,198$ ,  $D_n = 0,166$ ,  $U_{on} = 5,0007\text{ В}$ ,  $U_{ox} = 5,001\text{ В}$ ,  $U_{14n} = 1,5\text{ В}$ ,  $U_{14x} = 3,65\text{ В}$ ,  $I_{kn} = 1,14\text{ мА}$ ,  $I_{kx} = 1,6\text{ мА}$ ,  $I_{dn} = 0,113\text{ мА}$ ,  $I_{dx} = 0,495\text{ мА}$ ,  $R_{23} = 13\text{ кОм}$ ,  $R_{25} = 9,8\text{ кОм}$ ,  $T_c = 0,432\text{ мкс}$ . Далее выбираем ближайшие стандартные значения  $R_{23}$ ,  $R_{25}$  и  $C_{13} = T_c/R_1$ . Номинал  $R_{22} = 620\text{ Ом}$  выбираем из условия ненасыщения ИС2. Для новых значений параметров проводим проверочный расчет режимов по тем же уравнениям, но без неравенств и без переменных  $R_{23}$ ,  $R_{25}$ ,  $T_c$ . Заметим, что приближенно номиналы этих компонентов можно рассчитать и вручную, уточнив их при моделировании на PSpice. Далее необходимо рассчитать параметры цепочки частотной коррекции  $R_{21}$ ,  $C_{16}$ ,  $C_{17}$ , для чего нужно провести малосигнальный частотный анализ, как, например, в [5] для ККМ. Такой расчет в системе MathCAD довольно громоздок (из-за необходимости линеаризации уравнений) и чреват ошибками, а потому продемонстрируем, как его значительно проще его сделать в системе PSpice. Для этого составим эквивалентную схему КСН для усредненных переменных состояния (рис. 2).

Модель можно набрать как в текстовом файле, так и в схемном (проект в Capture).

Источник постоянного напряжения  $V_s = 380$  моделирует выход ККМ, а тестовый источник переменного напряжения  $V_{sac} = 1$  при расчете частотной характеристики и  $V_{sac} = 0$  — во всех остальных расчетах. Напряжение  $V(d)$  численно равно коэффициенту заполнения (см. далее). Силовой трансформатор считается идеальным и по входной цепи отображается зависимым источником тока  $G_{\Pi}(I_3, N, V(d))$ , а по выходной — зависимым источником напряжения  $E_{\Pi}(V_s, N, V(d))$ . Нулевой источник напряжения  $V_{is}$  служит датчиком тока выходной цепи. Сопротивление  $R_1$  моделирует сопротивление обмотки дросселя (на частоте коммутации), а  $R_{on}$  — сопротивления включенных транзисторов выходного выпрямителя, обмоток трансформатора и пересчитанных ко вторичной стороне  $R_{15}$  и транзисторных ключей. В схеме управления ИС2 считается безынерционной и моделируется зависимым источником тока  $G_1 = \text{value}\{S \times (V(106) - V_{op2})\}$ , хотя инерционность можно учесть через комплексный коэффициент передачи. Для оптрона (ИС3) можно использовать модель, которая имеется в библиотеке PSpice (в разделе optro) и учитывает инерционность фототранзистора

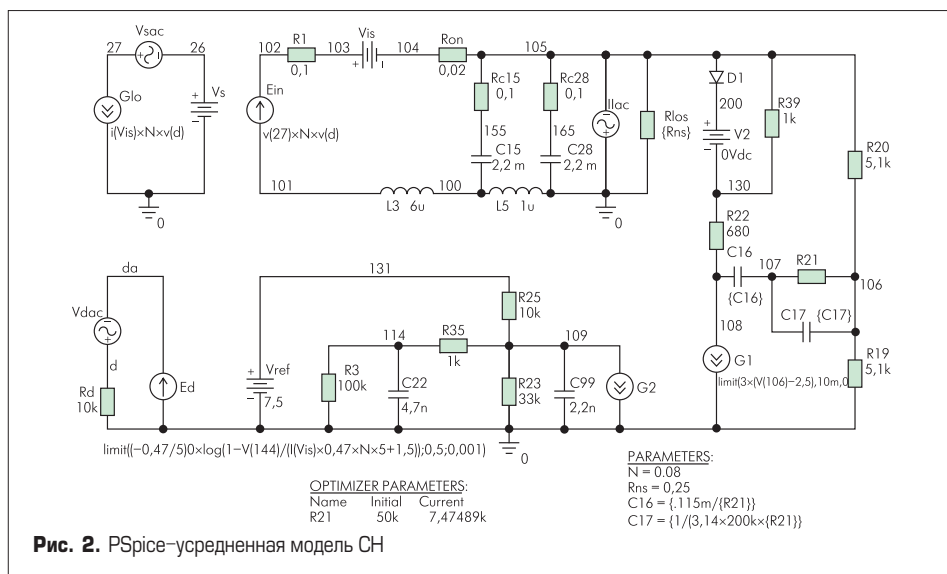


Рис. 2. PSpcice-усредненная модель СН

и зависимость коэффициента от тока. Здесь для простоты оптрон моделируется по входной цепи диодом и датчиком тока V2, а по выходной — зависимым источником тока  $G2 = \text{value}\{K_{opt} \times I(V(2))\}$ , инерционность его моделируется емкостью  $C_{op}$ , которая для данной схемы дает такой же эффект, что и библиотечная модель. Для моделирования ШИМ-контроллера из последнего уравнения ММ нужно выразить  $D$  в явном виде. Так как это уравнение трансцендентное, точное выражение для  $D$  получить нельзя. Приближенно, считая ток дросселя на этапе  $D \times T$  постоянным, представляем  $D$  зависимым источником напряжения:

$$E_d = \text{value}\{\text{limit}((-T_c/T) \times \log(1 - V(114)/(I(V_{is}) \times K_{op} \times R15 \times N + V1)); 0,5; 0,001)\}.$$

Здесь  $T_c = R1 \times C15 = 0,47$  мкс, 0,5 и 0,001 верхний и нижний пределы изменения  $D$ . С помощью этой модели можно рассчитать статические и переходные характеристики при изменении напряжения питания и сопротивления нагрузки, а также частотные характеристики  $K_u$  (при  $V_{sac} = 1$ ),  $R_{out}$  (при  $I_{lac} = 1$ ) и  $W$  (при  $V_{dac} = 1$ ). Рассмотрим, как можно рассчитать параметры  $R21$ ,  $C16$ ,  $C17$ , исполь-

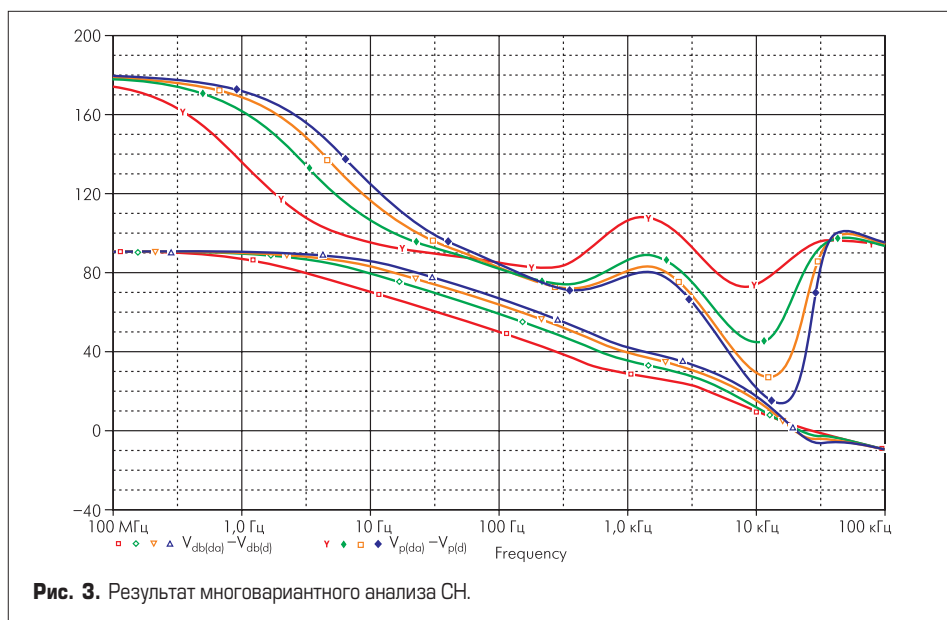
зуя многовариантный анализ по данной модели. Для устойчивости схемы КСН необходимо, чтобы петлевой коэффициент  $W$  на частоте, равной половине частоты коммутации ( $1/2 \times T$ ), имел запас не менее 10 дБ, а его фаза — запас не менее 40 градусов в диапазоне от нуля до этой частоты. Емкость  $C16$  вместе с  $R21$  образуют нуль  $W$ . Для получения достаточно широкой полосы пропускания  $W$  зададим частоту этого нуля, равную резонансной частоте первого звена фильтра. Емкость  $C17$  служит для уменьшения влияния высокочастотных помех на высоких частотах. Таким образом,  $R21$ ,  $C16$ ,  $C17$  задаются как параметры, причем  $R21$  варьируется, а  $C16$ ,  $C17$  вычисляются:

$$C16 = \frac{\sqrt{L3 \times C15}}{R21}; \quad C17 = \frac{T}{\pi \times R21}.$$

Результаты многовариантного анализа модели (рис. 2) при изменении  $R21$  от 5 кОм до 35 кОм с шагом 10 кОм приведены на рис. 3. Удовлетворяет сформулированным выше требованиям (запас по фазе не менее 40 градусов) второй вариант ( $R21 = 15$  кОм).

Выбор варианта можно автоматизировать, если применить PSpcice Optimizer.

Для расчета цепочки частотной коррекции КСН с помощью PSpcice Optimizer необходи-



мо создать графическую модель СН в Capture (рис. 2). Параметры модели: коэффициент передачи трансформатора  $N$ , сопротивление нагрузки  $R_{ns}$  и значение емкостей цепи коррекции  $C16$  и  $C17$  задаются в директиве «Parameters» (библиотека Special, элемент PARAM).  $C16$  задается как  $\{.115m/\{R21\}\}$ , а  $C17$  как  $\{1/(3.14 \times 200k \times \{R21\})\}$ , то есть, как и ранее. Параметры оптимизации задаются в директиве «Optimizer Parameters», которая вызывается из меню PSpice — пункт Place Optimizer Parameters. В нашем случае задается значение сопротивления  $R21$ , значение по умолчанию «Initial Value» задается равным 4 кОм, диапазон возможных значений «Lower Limit» и «Upper Limit» задается от 1 до 100 кОм. После этого запускается PSpice Optimizer (меню PSpice — пункт Run Optimizer). В PSpice Optimizer в меню Edit задаются значения спецификаций «Specification». Для расчета цепи коррекции необходимы два условия.

Во-первых, требуется, чтобы модуль петлевого коэффициента усиления на половине частоты коммутации (100 кГц) был меньше -10 дБ. Для этого создаем спецификацию (меню Edit — пункт Specification и Add). В графе Target вводится значение модуля «-10», в графе Range точность «1», в графе Constraint ставится галка и в поле Type выбирается «<= target», и наконец, в графе Evaluate вводится функция модуля петлевого коэффициента усиления на частоте 100 кГц в виде:  $\text{yax}(V_{db(da)} - V_{db(d)}, 100k)$ .

Во-вторых, задается условие, чтобы минимальная фаза петлевого коэффициента усиления во всем диапазоне частот была равна 45 градусам. Для этого создается вторая спецификация, в графе Target вводится значение фазы 45, в графе Range точность «4» и в графе Evaluate вводится функция минимального значения фазы петлевого коэффициента усиления в диапазоне частот в виде:  $\text{min}(V_{p(da)} - V_{p(d)})$ .

Затем в меню Tune выбирается пункт Auto и подпункт Start и производится расчет значения  $R21$ , которое удовлетворяло бы двум заданным условиям (спецификациям).

Результаты расчета:  $R21 = 15,3$  кОм, запас по амплитуде 9,6 дБ, запас по фазе 45,5 градуса, что практически совпадает с результатами многовариантного анализа.

Данная методика параметрического синтеза применима и для большего (до 8) числа оптимизируемых параметров, когда многовариантный анализ для этой цели малопродуктивен.

## Литература

1. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. М.: Нолидж, 1999.
2. Радевиц В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р, 2001.
3. Sherf M., Zverev I. 200W SMPS Demonstration Board. AN\_CoolMOS\_06 <http://www.infineon.com>
4. High Performance Power Combi Controller TDA 16888. Infineon Data Sheet 2000-02-08.
5. Каюков Д. С., Недолужко И. Г. Анализ и проектирование корректора коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. № 11'2003.