

Моделирование устойчивости электронных схем

Каждый специалист, занимающийся аналоговой схемотехникой, нередко сталкивается с проблемой самовозбуждения разработанной конструкции. Обычно самовозбуждение устраняется подбором подходящего места включения корректирующих элементов с использованием имеющегося опыта и литературных источников, либо «методом научного тыка», когда элементы коррекции подключаются куда попало до исчезновения возбуждения. В любом случае выбрать коррекцию оптимально, чтобы получить наилучшие характеристики устройства, достаточно сложно.

Решение этой задачи проработано в теории автоматического регулирования, где склонность системы к самовозбуждению оценивается степенью ее устойчивости. Практически любой физический объект, и электронную схему в том числе, можно представить в виде системы автоматического регулирования с обратной связью, на которую действуют различные управляющие и возмущающие воздействия. Теория автоматического регулирования позволяет формализованными методами оценивать свойства объекта независимо от его физической природы. Тем, кто не изучал теорию автоматического регулирования специально, для дальнейшей работы в этом направлении придется протудировать какой-нибудь из учебников [1].

В самом упрощенном виде функциональная схема системы автоматического регулирования изображена на рис. 1. Схема включает в себя звено прямой передачи сигнала с передаточной функцией W_1 , звено обратной связи с передаточной функцией W_0 и сумматор. Управляющее воздействие может

оказывать входной сигнал в случае усилителя низкой частоты или опорное напряжение для стабилизатора напряжения. В качестве возмущающих воздействий выступают изменения напряжения питания, сопротивления нагрузки, температуры окружающей среды и т. д. Напряжение самовозбуждения также можно рассматривать в качестве возмущающего воздействия, поступающего с выхода устройства на его вход через цепь обратной связи. В данном случае сигнал U оказывает управляющее воздействие, X — возмущающее, а сигнал Y — выходной.

Степень устойчивости замкнутой системы оценивается по частотным характеристикам ЛАЧХ (логарифмическая амплитудно-частотная характеристика) и ЛФЧХ (логарифмическая фазо-частотная характеристика) разомкнутой системы.

Принципы теории можно применить и в готовой конструкции, имея соответствующее оборудование, однако это потребует постановки очень большого числа опытов и больших затрат времени на анализ полученных результатов. Програм-

мы анализа электронных схем позволяют провести эти опыты гораздо быстрее и нагляднее.

Рассмотрим возможности анализа устойчивости схемы стабилизатора напряжения на примере использования программы OrCAD 9.2 [2]. Аналогично можно провести анализ, используя систему DesignLab 8.0 [3].

Передаточная функция разомкнутой системы при описании ее функциональной схемы совершенно не зависит от места разрыва цепи обратной связи и, следовательно, от места введения возмущающего воздействия. На практике для электронных схем чаще всего это правило недействительно. В них отсутствует в явном виде такое устройство, как сумматор, а выполняющие его роль входы усилителя зачастую имеют неодинаковые характеристики. Так что наиболее рационально при моделировании вводить имитацию возмущающего воздействия в точке его возникновения. Для усилителей и стабилизаторов это вывод цепи обратной связи, соединенный с выходом схемы. При анализе очень важно сохранить работоспособность схемы по постоянному току, и в то же время исключить проникновение испытательного сигнала в другие цепи. Если при практической реализации это может вызывать проблемы как на очень низких, так и на очень высоких частотах, то программы моделирования допускают использование разделительных и заградительных реактивных элементов сколь угодно больших номиналов.

В схеме стабилизатора, изображенной на рис. 2, возмущающее

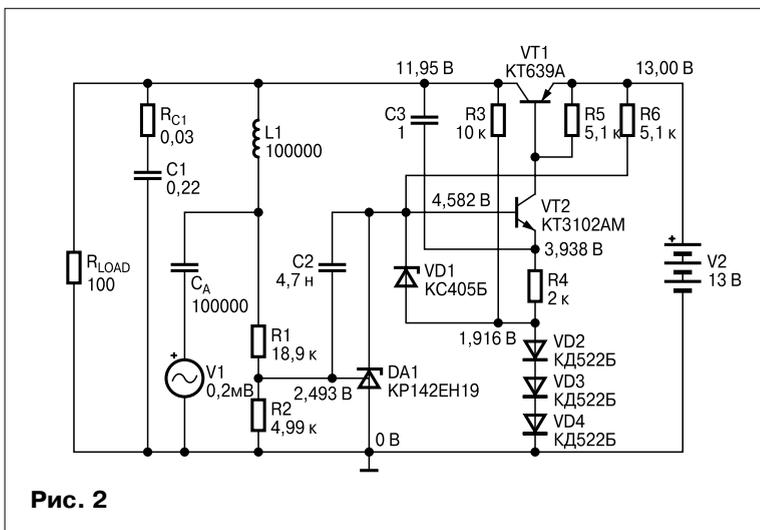
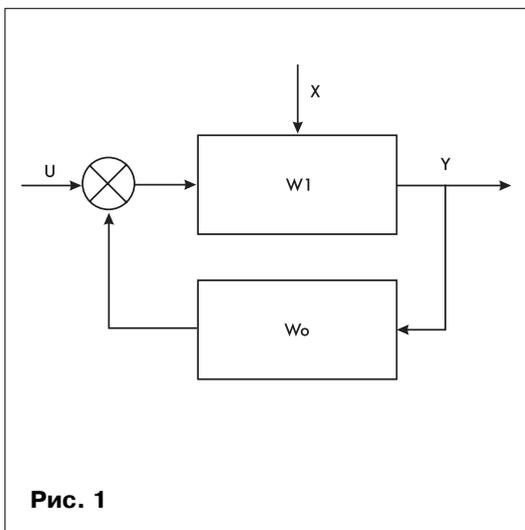


Таблица 1

ЛАЧХ	ЛФЧХ	С2	С3	Частота единичного усиления	Запас по фазе
A	A''	1 пФ	1 пФ	113 кГц	-54 °
B	B''	4,7 нФ		4,9 кГц	66 °
C	C''	51 пФ	1 пФ	266 кГц	19 °
D	D''		4,7 нФ	130 кГц	66 °

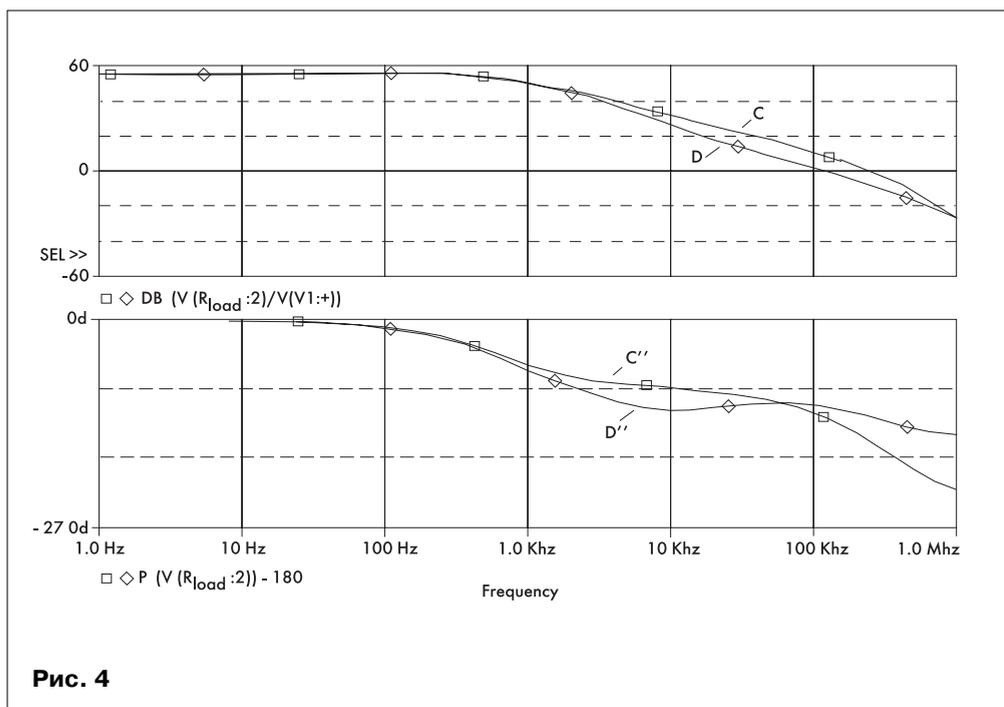
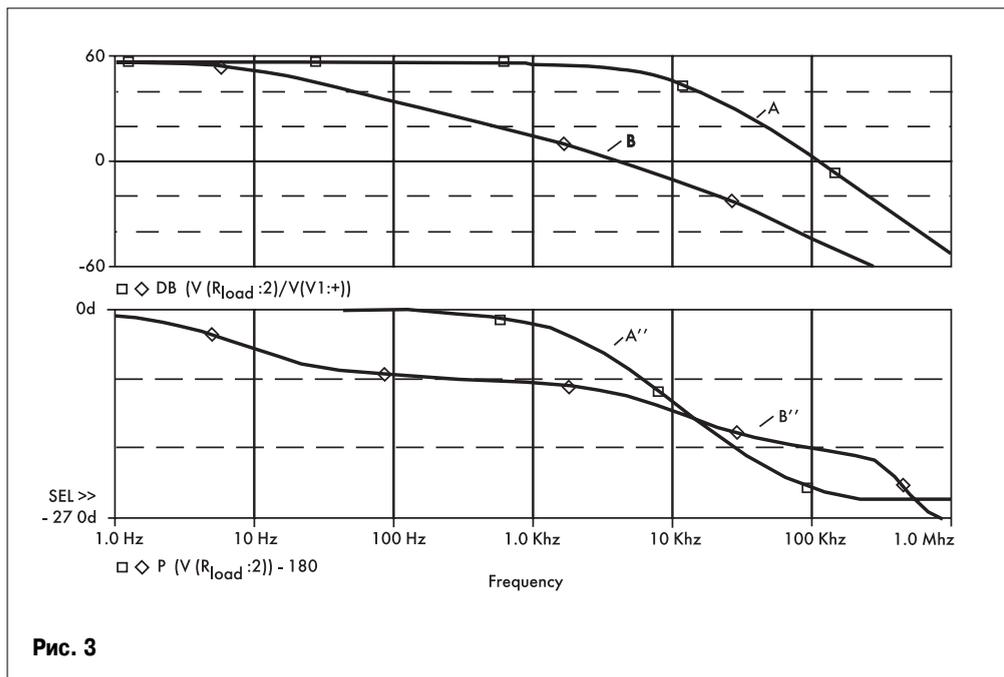
воздействие оказывает источник синусоидального напряжения V1, сигнал которого подается в схему через разделительный конденсатор C_a. Обратная связь по переменному току разорвана включением индуктивности L_a. Значения ем-

кости и индуктивности выбраны очень большими в основном затем, чтобы получить неискаженные характеристики схемы в области низких частот для большей наглядности анализа. Следует сразу отметить, что напряжение источника

сигнала должно быть выбрано достаточно малым для того, чтобы при коэффициенте передачи разомкнутой системы, достигающем 100 дБ, напряжение на выходе схемы хотя бы не превышало напряжения источника питания. Поскольку

программа оперирует не реальными элементами схемы, а их упрощенными моделями, при анализе можно получить значения напряжений в миллионы вольт и токов в тысячи ампер. Анализ будет проведен, но его результаты могут быть некорректными.

Элементами коррекции служат конденсаторы С2 и С3, причем для демонстрации возможности оптимизации характеристик схемы анализ проведен при различных значениях этих емкостей. Анализ сводится к расчету частотных характеристик при одновременном изменении параметров элемента схемы. В графическом редакторе схем PSpice Schematics, входящем в состав OrCAD 9.2, это анализ по директиве AC Sweep с одновременным включением Parametric, последующим построением логарифмических амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик и определением степени устойчивости системы. При задании параметров режима AC Sweep следует установить характер изменения частоты декадами, а значения начальной и конечной частоты такими, чтобы полученные потом характеристики перекрывали как область постоянного усиления, так и область, в которой коэф-



коэффициент передачи разомкнутой системы меньше единицы. В практических применениях для низкочастотных схем полоса частот обычно выбирается в пределах от 1 Гц до 1 МГц, реже от 0,1 Гц до 10 МГц. Вариация значений параметра элемента коррекции задается как изменение глобального параметра с начальным значением, не оказывающим практического влияния на характеристики.

Графики частотных характеристик схемы стабилизатора, построенные программой Probe при различных сочетаниях значений корректирующих конденсаторов C2 и C3, приведены на рис. 3, 4, а результаты анализа — в табл. 1.

Из-за того, что испытательный сигнал инвертируется схемой, при построении ЛФЧХ к реальному фазовому сдвигу добавлена составляющая -180° , чтобы привести характеристику к виду, принятому в теории автоматического регулирования.

Графики В, В† демонстрируют характеристики, полученные в результате коррекции, рекомендованной изготовителем микросхемы управляемого стабилизатора TL431 (аналог микросхемы КР142ЕН19). Анализ вида ЛАЧХ показывает, что при этих значениях емкостей C2 и C3 реализуется метод демпфирования с подавле-

нием высоких частот, который значительно снижает быстродействие системы.

Улучшить результаты можно изменив способ коррекции. Если использовать метод демпфирования с подавлением средних частот, приведя ЛАЧХ разомкнутой системы к типу 3 по Санковскому-Сигалову, можно получить устойчивую схему стабилизатора, способную работать с быстроизменяющейся нагрузкой. Характеристики схемы, скорректированной подобным образом, изображены на графиках

C, C†(рис. 4).

Устойчивость замкнутой системы определяется наличием необходи-

мого запаса по фазе на частоте единичного усиления, который не должен быть менее 20° . Анализ графиков на рис. 3, 4 позволяет сделать вывод, что схема без коррекции обязательно возбудится, тогда как у скорректированной схемы имеется необходимый запас по фазе.

Наличие запаса по фазе на частоте единичного усиления разомкнутой системы является необходимым, но не всегда достаточным условием устойчивости замкнутой системы. Могут быть случаи, когда анализ устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам достаточно затруднителен. Уточнить результаты анализа можно, построив амплитудно-фазовую характеристику (годограф) разомкнутой системы на комплексной плоскости и применив для ее анализа критерий устойчивости Найквиста.

Для построения годографа необходимо провести частотный анализ, причем желательно только в области частот, непосредственно примыкающих к частоте единичного усиления. Следует учесть, что программа Probe не позволяет строить семейство характеристик, подоб-

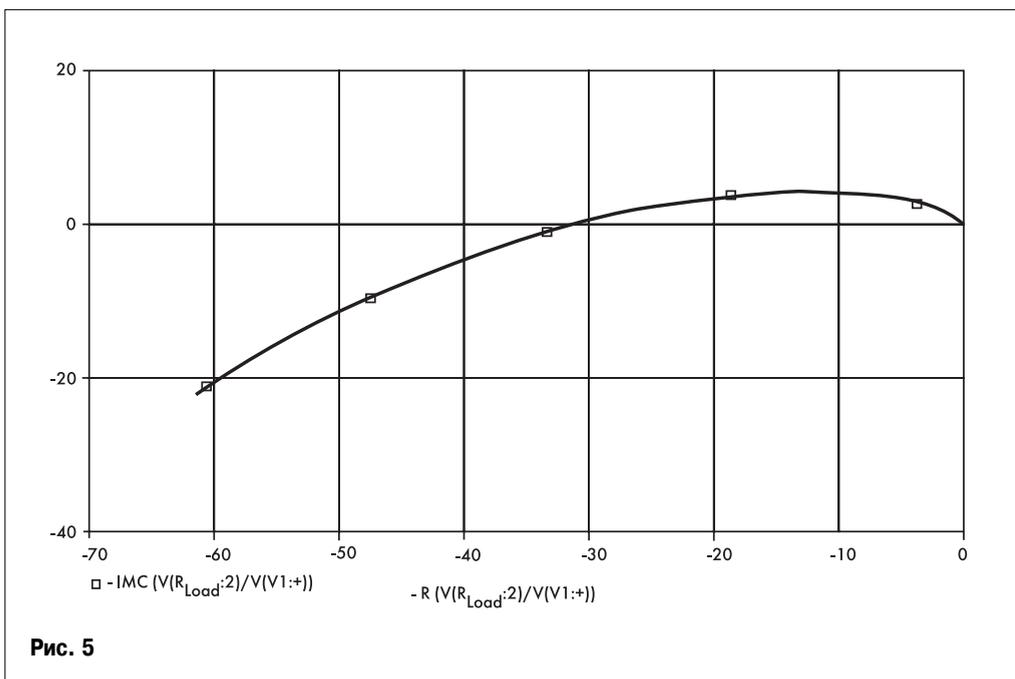


Рис. 5

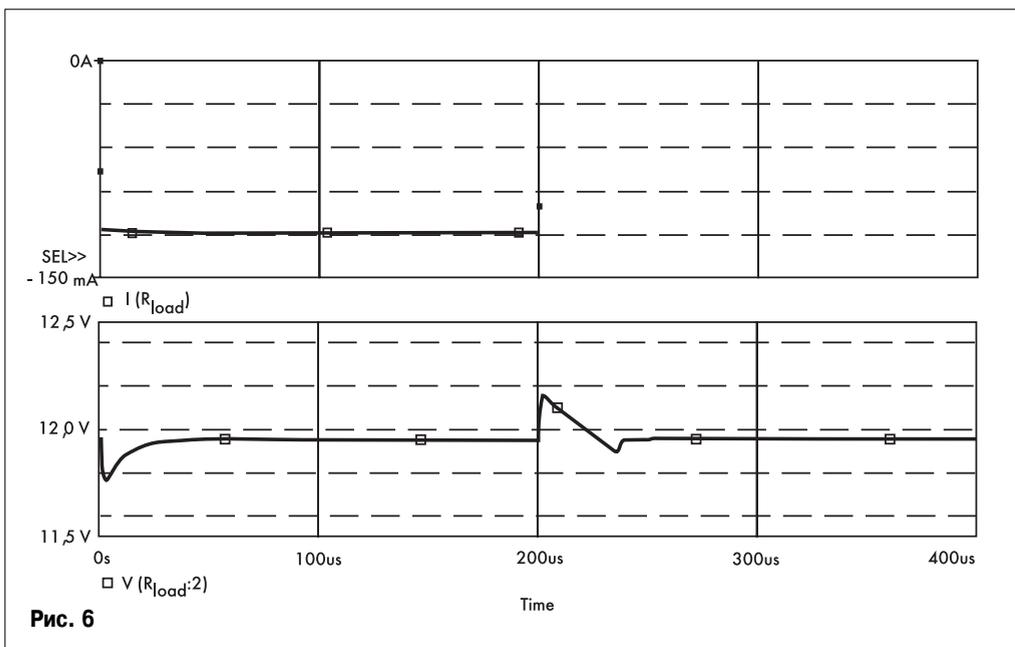


Рис. 6

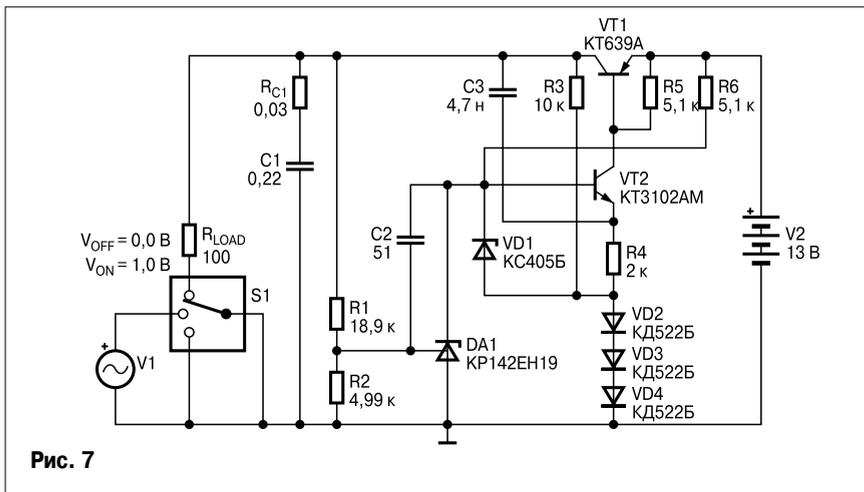


Рис. 7

ных годографа, и если в процессе анализа получено несколько результатов, то для дальнейшей работы следует выбрать один. Для построения годографа следует изменить шкалу по оси x на линейную и изменить имя переменной, откладываемой по оси x , на вещественную часть амплитудно-фазовой частотной характеристики. Дальше в полученной координатной плоскости строится график мнимой части амплитудно-фазовой частотной характеристики.

На рис. 5 изображен годограф некомпенсированной схемы стабилизатора для области частот от 20 кГц до 1 МГц, который охватывает точку с координатами $[-1, j0]$, что свидетельствует о неустойчивости замкнутой системы. На графике переменные по осям x и y отложены со знаком минус, чтобы, как и в случае построения ЛФЧХ, привести характеристику к виду, принятому в теории автоматического регулирования.

Степень устойчивости не является единственным критерием качества системы автоматического регулирования. Хотя схема стабилизатора получилась устойчивой при двух различных способах коррекции, ее динамические свойства совершенно не одинаковы. Продемонстрируем качество переходного процесса схемы со вторым способом коррекции, изображенной на рис. 7 со всеми элементами, необходимыми для моделирования. Графики тока через сопротивление нагрузки и выходного напряжения, построенные по результатам расчета переходного процесса по директиве *Trasient* (рис. 6), показывают неплохие динамические свойства схемы. Качество переходного процесса схемы с первым вариантом коррекции много хуже.

Системы проектирования со средствами моделирования являются мощным инструментом, однако не дают абсолютной гарантии достоверности полученных результатов. Приступая к моделированию следует учитывать, что поведение схемы моделируется на основе иногда достаточно упрощенных моделей электронных компонентов, в особенности это касается моделей интегральных схем. Желательно пользоваться моделями, предоставляемыми фирмами-изготовителями соответствующих компонентов, поскольку адекватную модель можно создать, только имея большой и достоверный статистический материал. Отечественные компоненты можно заменять импортными аналогами, правда, при этом лучше убедиться самому в соответствии характеристик приборов друг другу. Ну и, наконец, обязательно следует

убедиться в правильности произведенных расчетов на макете устройства.

Литература

1. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал) — М.: Машиностроение, 1977.
2. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. — М.: Солон-Р, 2001.
3. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. — М.: Солон, 1999.

Михаил Пушкарев,