

# МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСШИРЕННЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ В PSpice 2017

А.Акулин<sup>1</sup>, А.Супонин<sup>2</sup>

УДК 621.3.049

БАК 05.27.00

На рынке представлено множество бесплатных и платных симуляторов аналоговых схем. Все они основаны на вычислительном ядре Spice и различаются интерфейсом пользователя и дополнительными функциями. Стандартом для схемотехнического моделирования "де факто" считается продукт компании Cadence Design Systems – система PSpice, которая обеспечивает двустороннюю связь со схемотехническим редактором Cadence – OrCAD Capture, обладает расширенными возможностями анализа, работает с моделями, описанными на языке высокого уровня C/C++, и оснащена другими полезными функциями, что позволяет значительно повысить эффективность всех этапов проектирования аналоговых и цифро-аналоговых схем. Рассмотрим особенности новой версии этого программного продукта и преимущества, которые получает при его использовании разработчик.

Если нужно выполнить моделирование небольшой схемы, содержащей несколько транзисторов и пассивных компонентов, можно использовать простейшие бесплатные и доступные в Интернете Spice-симуляторы (такие как, например, OrCAD Lite на сайте [www.orcad.com](http://www.orcad.com)). Однако более продвинутые инструменты для схемотехнического моделирования могут дать разработчику значительно больше преимуществ. Дополнительные возможности таких продуктов, как OrCAD PSpice с опцией PSpice Advanced Analysis, позволяют не

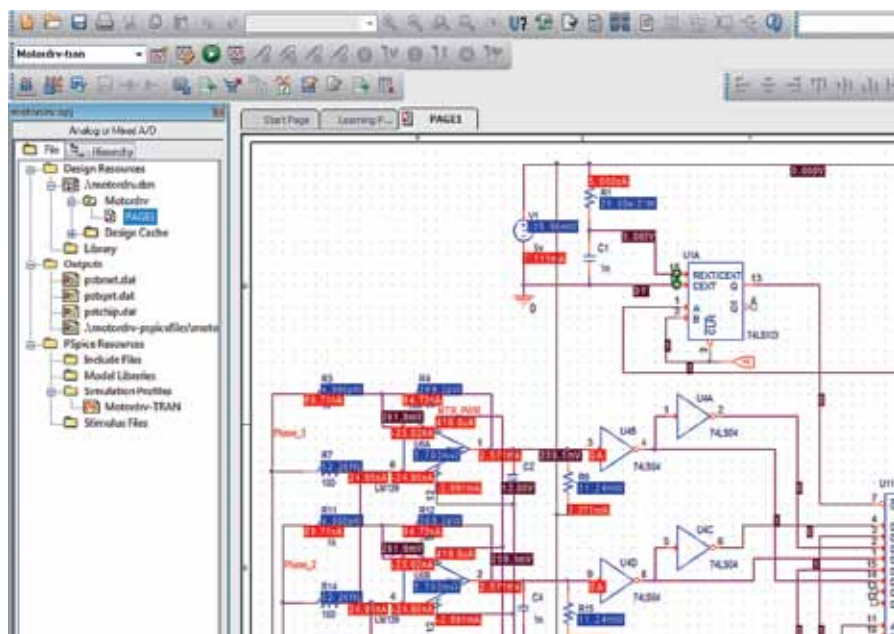


Рис.1. Схема в редакторе OrCAD Capture с результатами моделирования узловых напряжений и токов, полученными в PSpice

<sup>1</sup> ООО "ПСБ СОФТ", технический директор, [akulin@pcbsoft.ru](mailto:akulin@pcbsoft.ru).

<sup>2</sup> ООО "ПСБ СОФТ", инженер, [suponin@pcbsoft.ru](mailto:suponin@pcbsoft.ru).

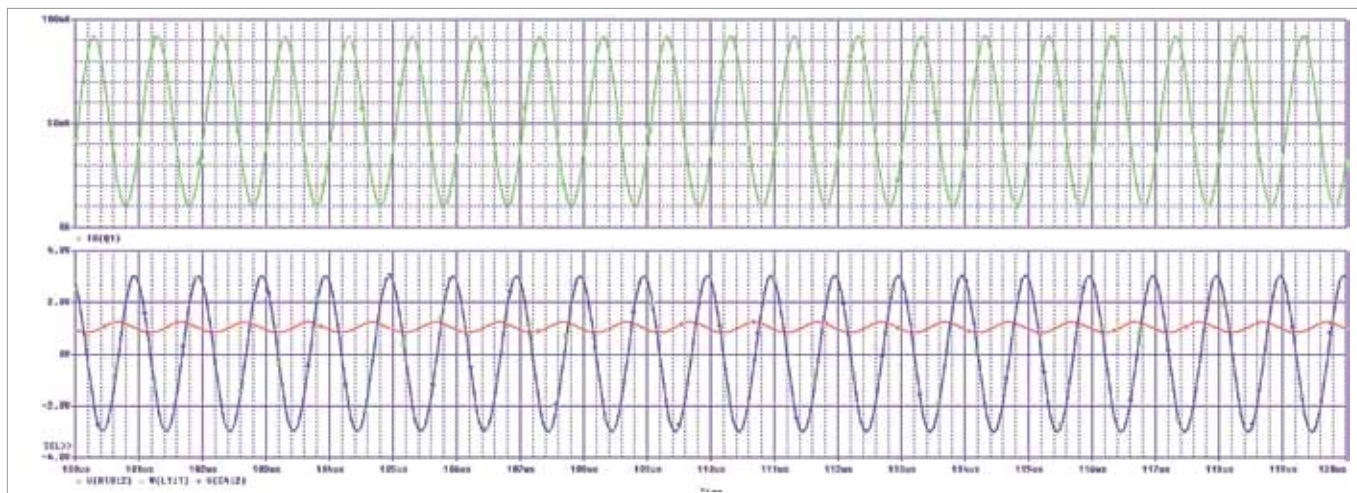


Рис.2. Пример осциллограмм, полученных в PSpice

только в разы уменьшить трудозатраты на разработку новых проектов, но и сэкономить много денег и времени для компании, повысив эффективность проектирования и отладки радиоэлектронной аппаратуры.

В составе линейки OrCAD PSpice предлагается несколько программных продуктов, различных по функционалу:

- OrCAD Lite – бесплатная "студенческая" версия системы OrCAD, имеющая ограничения по количеству цепей и по функционалу. Содержит схемный

редактор OrCAD Capture, редактор печатных плат OrCAD PCB Designer (Allegro inside) и некоторые виды анализа PSpice;

- OrCAD PSpice Designer – схемный редактор OrCAD Capture и все базовые виды анализа PSpice;
- OrCAD PSpice Designer Plus – схемный редактор, базовые виды анализа, а также блок расширенных видов анализа Advanced Analysis (чувствительность, оптимизация и др.);
- Allegro PSpice Simulator – старшая линейка САПР Allegro, базовые виды анализа, а также блок расширенных видов анализа (чувствительность, оптимизация и т.д.);
- OrCAD PCB Designer Professional with PSpice – практически полный набор приложений, включая симулятор PSpice, схемный редактор OrCAD Capture, редактор печатных плат PCB Editor, автотрассировщик SPECCTRA, симулятор целостности сигналов SigXplorer и т.д.;
- Allegro PSpice Systems Option – опция для стыковки PSpice с пакетом Matlab/Simulink.

OrCAD PSpice Designer состоит из нескольких связанных между собой приложений:



Рис.3. Панель поиска компонента по категориям PSpice Part Search

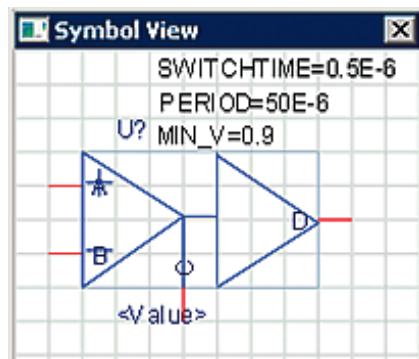


Рис.4. Предварительный просмотр схемного символа в библиотеке PSpice



Рис.5. Поиск моделей в Интернете: а – окно схемного редактора Capture – OrCAD Capture Marketplace; б – окно поиска моделей с фильтрами

- Capture – схемный редактор для создания и редактирования электрических схем;
- PSpice Model Editor – редактор для создания и корректировки Spice-моделей;
- Stimulus Editor – редактор входных воздействий;
- Magnetic Parts Editor – редактор моделей магнитных компонентов;
- PSpice A/D – вычислительное ядро симулятора для цифровых и аналоговых схем;
- PSpice Advanced Analysis – дополнительные модули для расширенного анализа схем.

Программа PSpice содержит большое количество готовых библиотек Spice-моделей и схемных символов. Кроме того, в Интернете доступны многочисленные дополнительные модели – на сайтах производителей электронных компонентов и на специализированных порталах. Все они, как правило, совместимы именно с PSpice.

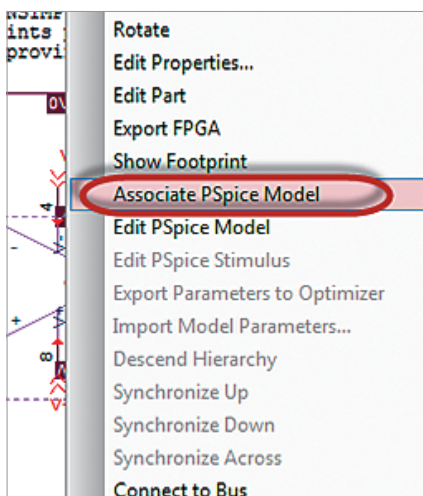
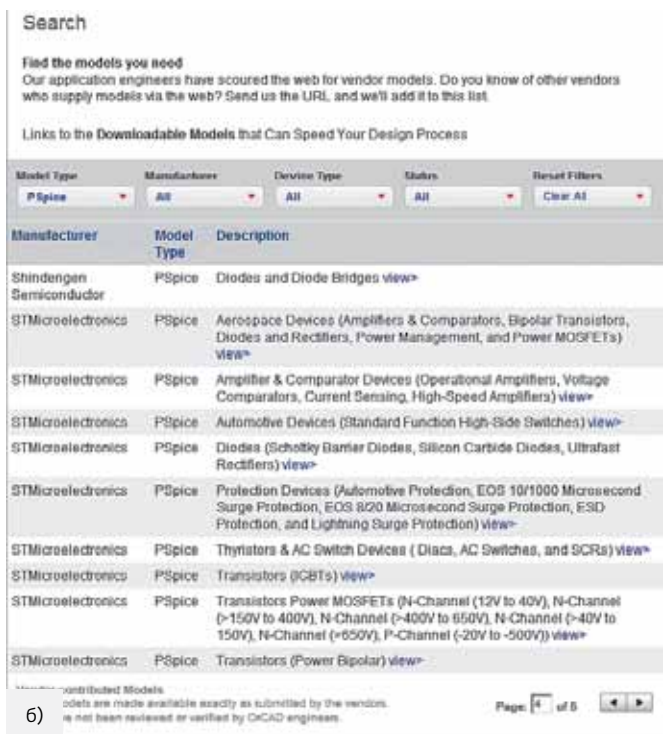


Рис.6. Меню правой кнопки мыши для добавления Spice-модели к компоненту

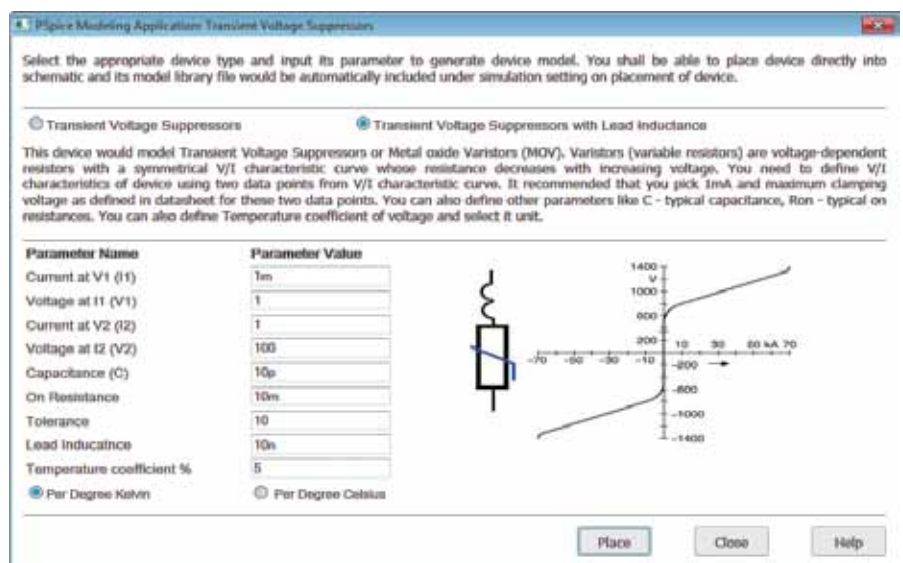


Рис.7. Создание модели варистора с помощью PSpice Modelling Apps

Надо отметить, что PSpice предоставляет широкий набор средств как для моделирования, так и для обработки результатов анализа. Удобный и интуитивный интерфейс схемного редактора позволяет легко назначать модели, устанавливать точки для контроля напряжений, токов и мощности (рис.1), пользоваться формулами для построения требуемых графиков и осциллограмм, отображать результаты моделирования – и на одном графике, и в разных осях (рис.2).

Двусторонняя связь PSpice с популярными схемотехническими редакторами OrCAD Capture CIS / Allegro Design Entry CIS позволяет создавать схемы непосредственно в САПР OrCAD / Allegro и сразу же моделировать их поведение, не перерисовывая их в других редакторах.

Возможность совместного использования моделей на языках C / C++, SystemC, Verilog-A делает PSpice еще более мощным и удобным инструментом, позволяя моделировать цифро-аналоговые схемы, в состав которых входят микроконтроллеры, а также вставлять в схему поведенческие модели, управляемые формулами или алгоритмами. В Интернете и в книжных магазинах представлено много статей и литературы на русском языке, посвященных применению OrCAD PSpice для различных видов моделирования и анализа схем.

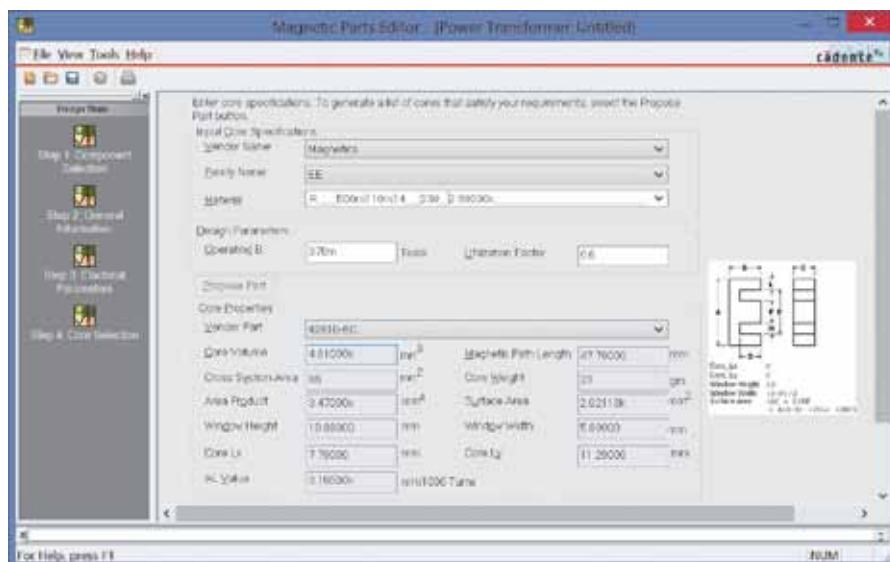


Рис.8. Создание моделей индуктивных компонентов в PSpice

Библиотеки программы, которые не требуют дополнительной установки, содержат более 33 тыс. аналоговых и цифровых компонентов со Spice-моделями. Специальная панель PSpice Part Search (рис.3) в схемном редакторе OrCAD Capture обеспечивает мгновенный поиск требуемых компонентов. Они отображаются по категориям или по библиотекам, у каждого есть наименование (Part Name) и описание (Description). При выборе библиотечного компонента возможен предварительный просмотр схемного символа (рис.4). Кроме того, пользователи могут добавлять собственные компоненты в библиотеку.

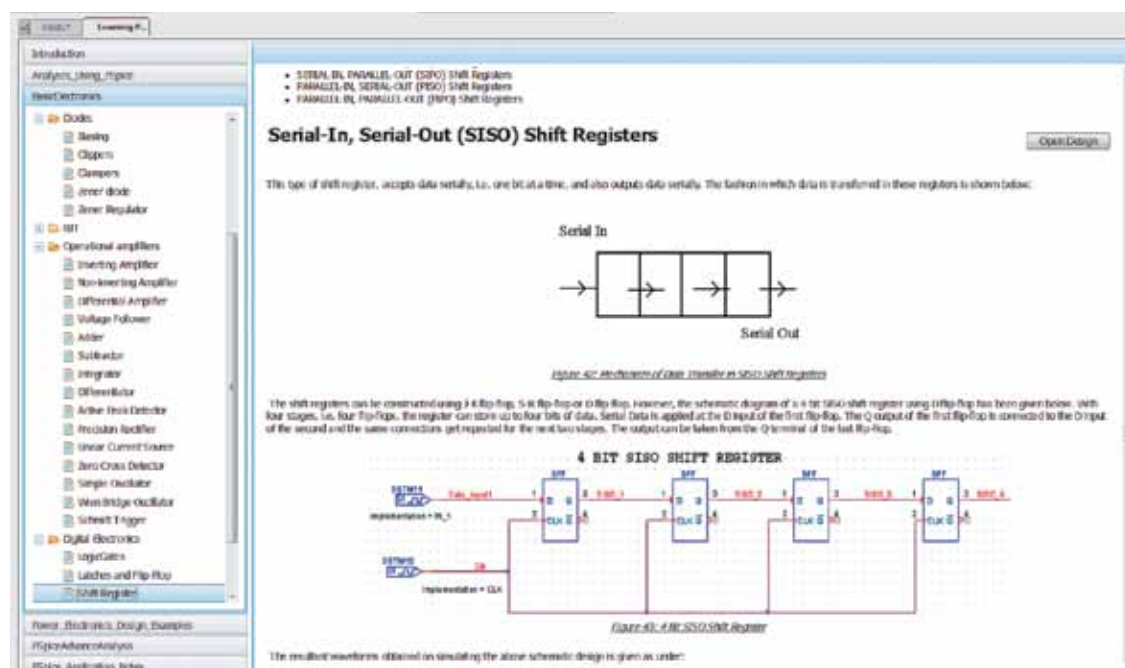


Рис.9. Интерактивный учебник, встроенный в OrCAD PSpice

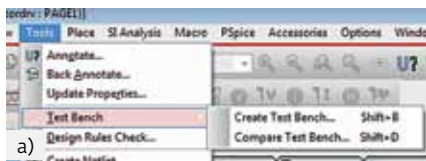
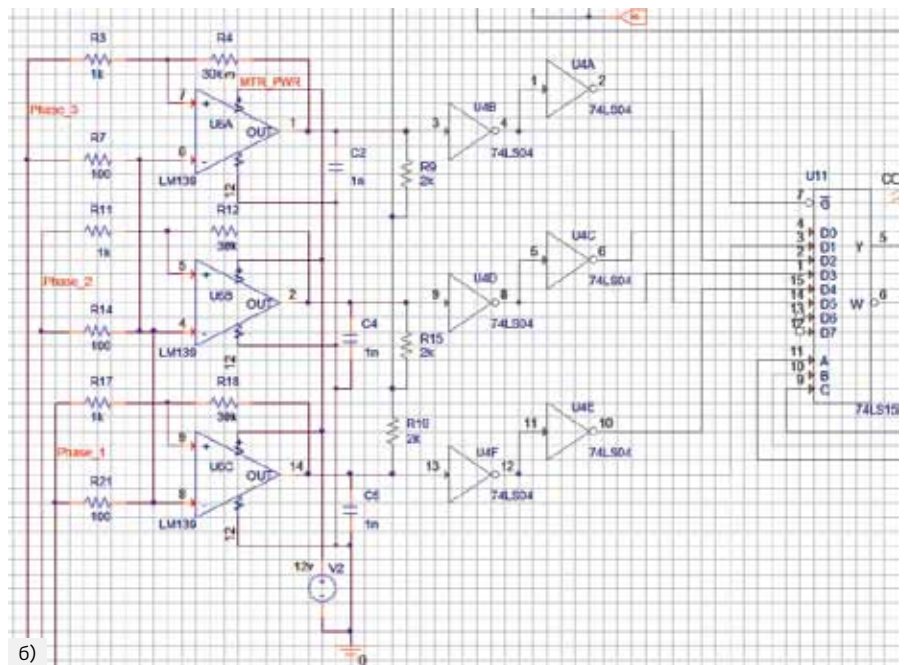


Рис.10. Моделирование части схемы: а – создание Test Bench из схемы OrCAD Capture; б – Test Bench на схеме выделен цветом

Также можно искать Spice-модели в Интернете. Перейти к онлайн-поиску удобно непосредственно через панель PSpice Part Search. Прямо в окне схематехнического редактора OrCAD Capture откроется портал OrCAD Capture Marketplace, вкладка Models (рис.5). Предлагается задать в ней фильтр поиска по типу модели, производителю компонента, типу устройства и т.д.

На портале OrCAD Capture Marketplace доступны дополнительные приложения для OrCAD и PSpice, которые можно скачать и установить на компьютере. Эти приложения повышают производительность OrCAD Capture и PSpice, добавляют новые удобные функции. Атрибуты компонентов и техническое описание можно загружать в библиотеку автоматически с помощью приложения Part Link от компании Digi-Key. Создавать новые модели удобно с помощью приложений PSpice Modelling Apps. Дополнительные возможности по моделированию обеспечивает приложение PSpice Monte Carlo Temperature Sweep.



Новые Spice-модели, найденные в Интернете или созданные с помощью приложений PSpice Modelling Apps, легко и быстро подключаются к компонентам прямо на схеме. Достаточно выделить компонент на схеме OrCAD Capture и выбрать команду правой кнопки мыши (ПКМ) – Associate PSpice Model (рис.6). С помощью команды Edit PSpice Model можно отредактировать текст модели в PSpice Model Editor. На рис.7 приведен пример создания модели варистора с помощью PSpice Modelling Apps.

Кроме того, в PSpice представлен редактор моделей индуктивных компонентов Magnetic Parts Editor – специальная программа для создания моделей трансформаторов, дросселей и индуктивностей.

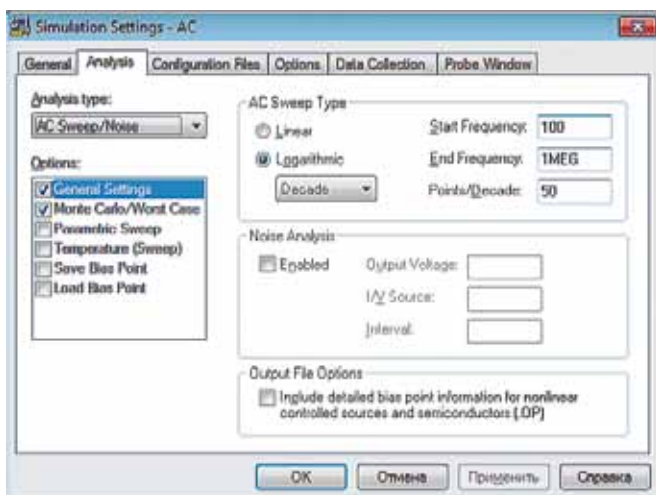


Рис.11. Настройки PSpice. Выбор вида анализа схемы

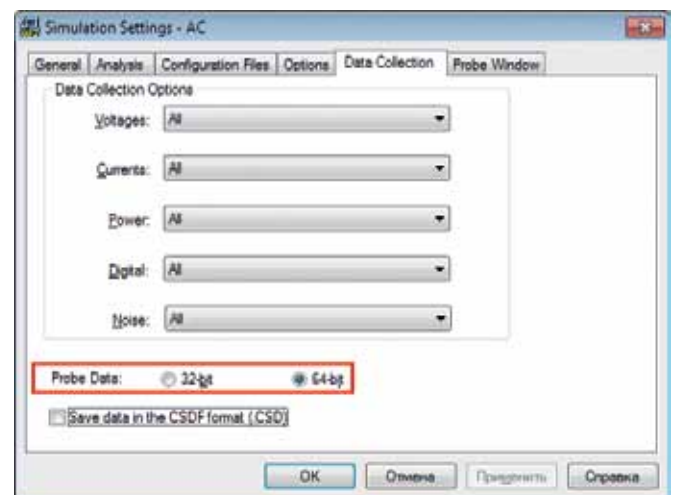


Рис.12. Настройки PSpice. Выбор точности вычислений 64 бита

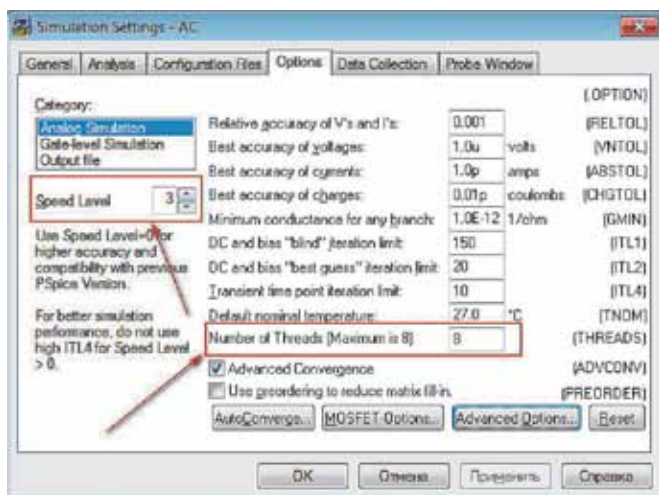


Рис.13. Настройки PSpice. Выбор скорости и количества задействованных ядер ЦП

Модели формируются на основе библиотеки материалов в точном соответствии с параметрами пользователя. Библиотека материалов может быть отредактирована и дополнена новыми материалами. Пользователь может выбрать следующие виды компонентов:

- силовой трансформатор – Power Transformer (Sine and Pulse wave);
- прямоходовой преобразователь – Forward Converter (Single Switch Topology);
- двойной прямоходовой преобразователь – Forward Converter (Double Switch Topology);
- обратногоходовой преобразователь – Flyback Converter (Discontinuous Conduction Mode);
- катушка индуктивности постоянного тока – DC Inductor (Single Winding).

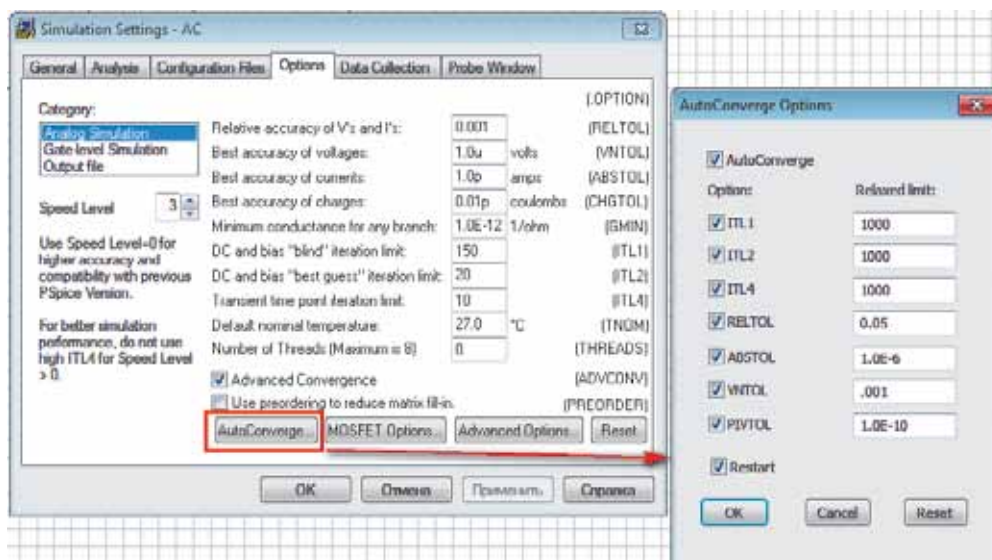


Рис.14. Настройки PSpice. Управление сходимостью вычислений

Пользователь может задать число обмоток, входные и выходные параметры, рабочие частоты, плотность тока, размеры и другие параметры индуктивных компонентов (рис.8).

Быстро освоить функционал PSpice помогает встроенный в программу интерактивный учебник с упражнениями и примерами, а также с готовыми настройками для моделирования (рис.9). Запустить учебник можно через меню Help – Learning PSpice. При этом в схемном редакторе откроется новая вкладка, в которой по категориям "от простого к сложному" представлены учебные материалы по изучению PSpice. Примеры схем в каждом разделе пользователь может открыть в схемном редакторе OrCAD Capture, просто нажав на соответствующую картинку левой кнопкой мыши, и сразу же промоделировать ее в PSpice с готовыми настройками проекта. В учебнике представлены не только проекты, но и теоретические аспекты различных схемотехнических решений. Учебник постоянно пополняется новыми материалами, поэтому пользователи, регулярно получающие обновления от Cadence, имеют возможность своевременно использовать новые главы учебника.

Благодаря функции Test Bench можно моделировать только часть схемы. Для этого надо ее выделить и создать из данного участка так называемый испытательный стенд (Test Bench) (рис.10). Можно использовать несколько Test Bench для одного или разных каскадов схемы. Кроме того, имеется возможность сравнить разные Test Bench и вывести на экран различия с помощью функции Compare Test Bench.

В PSpice можно выполнять следующие виды анализа схем (рис.11):

- анализ по постоянному току;
- анализ по переменному току;
- анализ шумов;



Рис.15. Настройки PSpice. Дополнительные опции для точной настройки параметров вычислений

- анализ переходных процессов;
- Фурье-анализ;
- параметрический анализ;
- температурный анализ;
- анализ разброса параметров методом Монте-Карло;
- анализ чувствительности методом наихудшего случая;
- анализ передаточной функции.

Кроме того, можно подключить возможности расширенного анализа схем с помощью функционала PSpice Advanced Analysis (пакет OrCAD PSpice Designer Plus или Allegro PSpice Simulator), а также состыковать симулятор PSpice с программой моделирования

электромеханических систем Matlab/Simulink (опция PSpice Systems Option).

Новая 64-битная версия PSpice отличается значительно более высокой производительностью вычислений и точностью результатов (рис.12). С помощью параметра Speed Level можно выбрать скорость вычислений, а параметр Threads позволяет задействовать для вычислений большее количество ядер процессора (рис.13).

При моделировании сложных схем актуальна проблема сходимости вычислений. В OrCAD PSpice она решается путем сбалансированного выбора количества настроек и наличием специальной функции автоконвергенции (AutoConverge).

В рамках данной настройки программа автоматически регулирует точность вычислений в заданных пределах для достижения сходимости (рис.14). Дополнительные опции (Advanced Options) позволяют более тонко настроить параметры вычислительного алгоритма (рис.15).

Во время моделирования можно ставить процесс на паузу и менять управляющие опции. Для длительных процессов есть возможность сохранить текущее состояние моделирования в контрольных временных точках, а затем загрузить и продолжить расчеты после изменения параметров (рис.16).

Результаты моделирования PSpice выводятся в графическом виде (см. рис.2), а также в текстовом

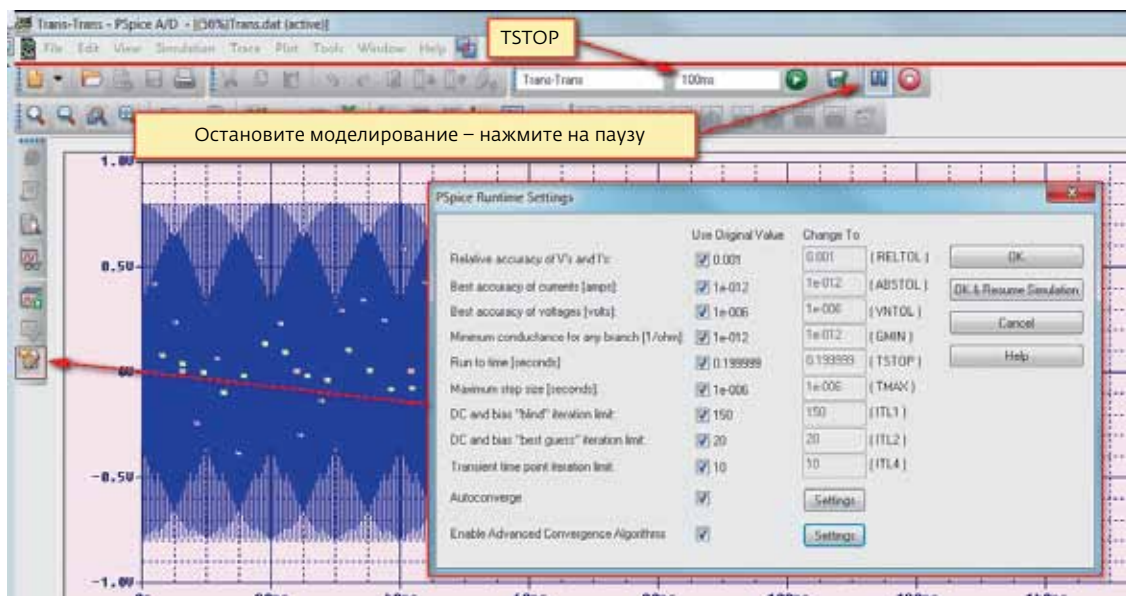


Рис.16. Изменение управляющих опций в процессе моделирования

```

1605 **** INITIAL TRANSIENT SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012

```

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(+12V)	12.0000	(-12V)	-12.0000	(H00027)	2.133E-06	(H00040)	-865.9E-06
(H00045)	-572.4E-10	(H00076)	-4.1860	(H00096)	-2.2100	(H00126)	-450.0E-09
(H00374)	-572.4E-10	(OUTPUT)	11.7330	(X_U1.6)	-0.164	(X_U1.7)	11.8490
(X_U1.8)	11.8670	(X_U1.9)	0.0000	(X_U1.10)	-0.6981		
(X_U1.11)	11.9610			(X_U1.12)	11.9609		
(X_U1.13)	-0.5948			(X_U1.14)	-0.5941		
(X_U1.53)	11.0000			(X_U1.54)	-11.0000		
(X_U1.90)	2.7115			(X_U1.91)	40.0000		
(X_U1.92)	-40.0000			(X_U1.99)	0.0000		

```

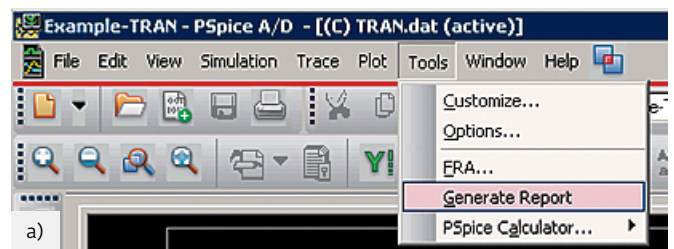
VOLTAGE SOURCE CURRENTS
MARK      CURRENT
-----
V_V1      3.083E-04
V_V2      1.624E-02
X_U1.vb   -1.665E-07
X_U1.vc   +1.645E-03
X_U1.vd   2.265E-11
X_U1.vim  2.711E-03
X_U1.wlp  -3.729E-11
X_U1.win  -4.272E-11
TOTAL POWER DISSIPATION 1.93E-01 WATTS

```

Рис.17. Текстовый файл с результатами расчетов

файле (рис.17). Кроме того, результаты в виде узловых напряжений, значений токов на выводах компонентов и уровня мощности отображаются непосредственно в окне схемного редактора OrCAD Capture (см. рис.1).

Также в PSpice появился новый вариант представления результатов моделирования. С помощью функции Tools – Generate Report пользователь может создавать собственные отчеты, включая в них среднее значение, среднеквадратичную величину, пиковые значения тока, напряжения и мощности. Форма отчета полностью



Bias Value	Max Current	Min Current	Average	RMS	Max di/dt
-6.724173n	112.818u	-107.338u	2.0684u	79.711u	3.27156k
7.738638u	8.34771u	7.46526u	7.69682u	8.17574u	371.011
1.152159m	1.15662m	1.14737m	1.1521m	1.15513m	449.078
-1.159897m	-1.15496m	-1.16438m	-1.1598m	1.163m	140.328
7.621675u	12.5479u	3.12497u	7.71598u	9.13441u	140.694
1.319403m	1.33103m	1.30601m	1.31882m	1.3277m	2.71846k
1.77024m	-1.31856m	-1.33416m	-1.32653m	1.33221m	238.868
0.2631u	49.1583u	-42.3958u	3.56082u	38.878u	2.92709k

Рис.18. Генерация настраиваемых HTML-отчетов в PSpice: а – функция генерации настраиваемых отчетов PSpice; б – вариант HTML-отчета

настраивается (рис.18). Файл скрипта TCL для генерации отчета находится в папке <installation>\tools\pspice\tclscripts\orPspReport. Для автоматической генерации HTML-отчетов может быть применена команда .TCLPOSTRUN.

В PSpice можно выполнять совместное моделирование аналоговой и цифровой части схемы. В одном окне виртуального осциллографа удобно построить необходимое количество графиков. На каждом графике допускается

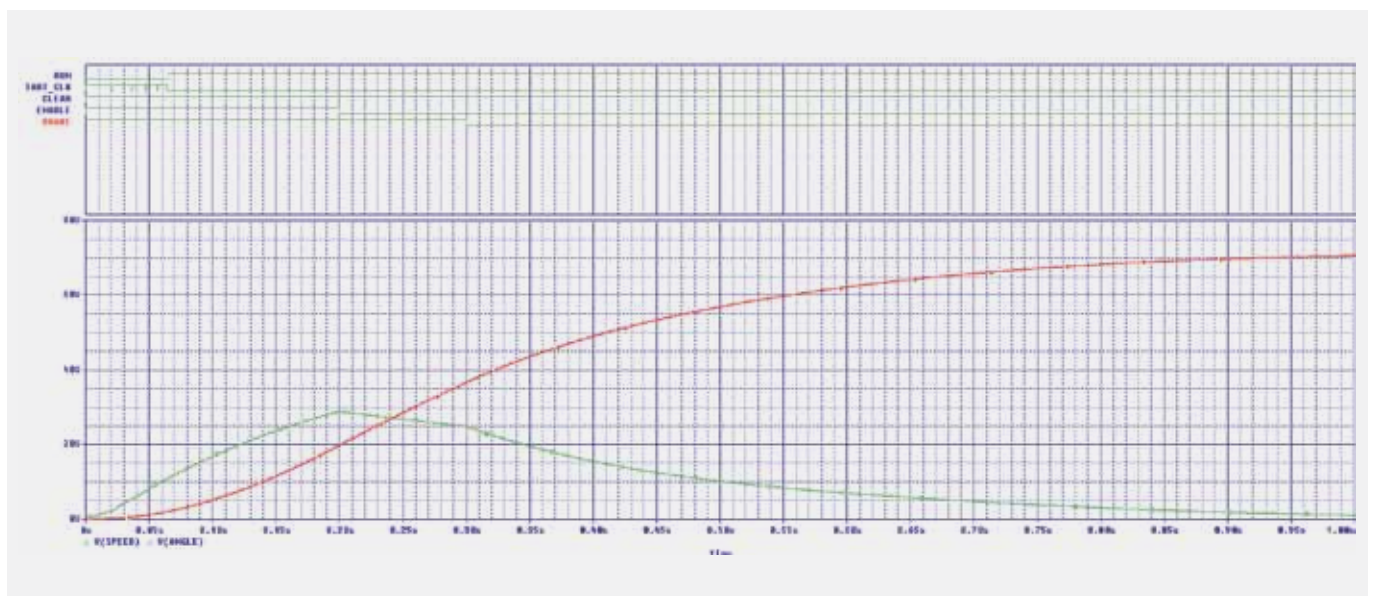


Рис.19. Совместное моделирование цифровых и аналоговых частей схемы



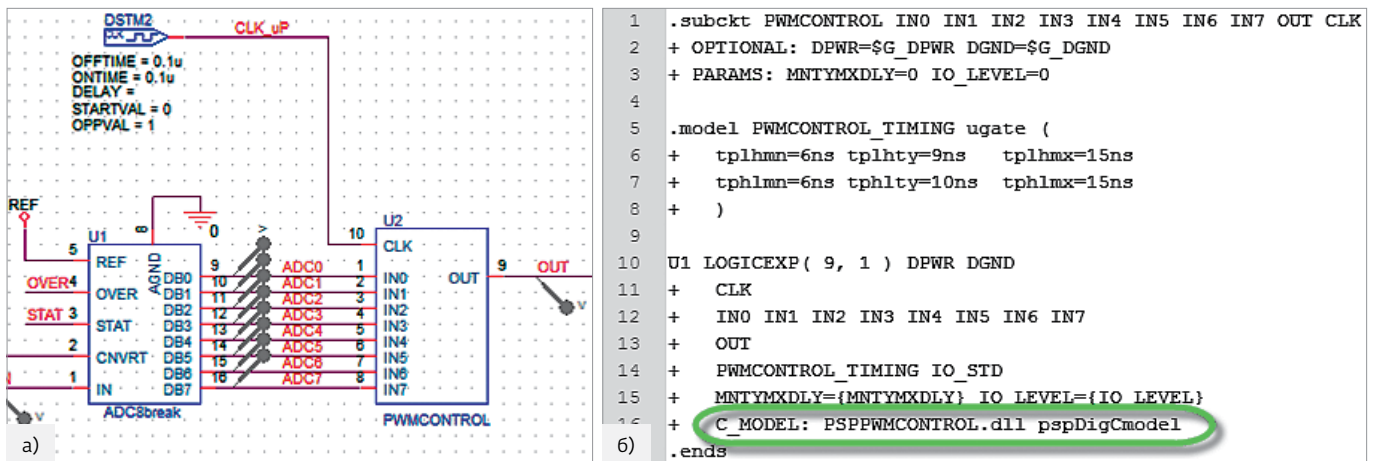
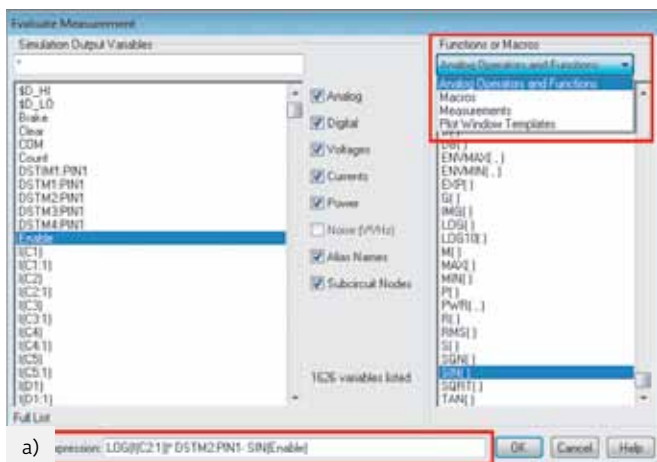


Рис.20. Подключение моделей, написанных на языке C/C++: а - пример схемы, в которой подключена модель на языке C++; б - определение модели как dll-функции



несколько осциллограмм, которые можно откладывать от разных вертикальных осей Y (рис.19). Осциллограммы можно легко переносить с одного графика на другой или в отдельное окно и там их обрабатывать.

В симуляторе PSpice доступно подключение моделей, описанных на языке высокого уровня C/C++. Программа на языке C/C++, например, может описывать поведение входов, выходов и внутренней логики микроконтроллера, а через порты ввода-вывода она управляет аналого-цифровой схемой. В этом случае код программы надо скомпилировать в виде dll-модуля и подключить его прямо в Spice-модель, описанную оператором .SUBCKT (рис.20).

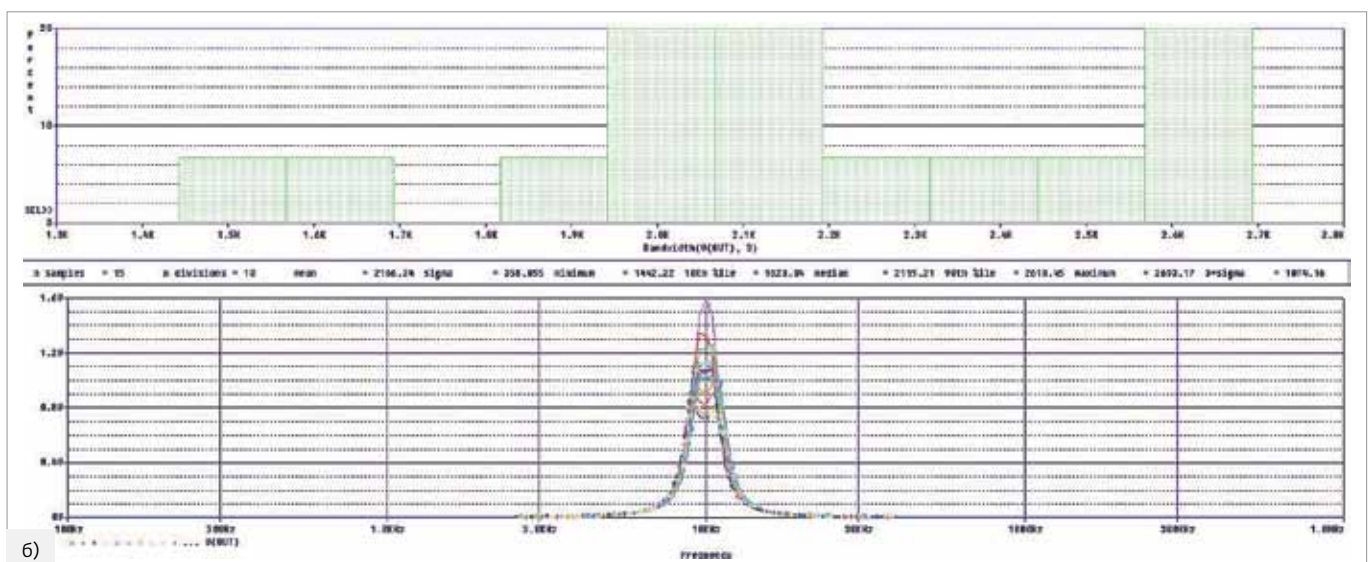


Рис.21. Обработка и визуализация результатов моделирования в PSpice: а - применение математических выражений и специальных функций обработки результатов; б - отображение результатов в виде гистограмм или частотных спектров

Полезны функции обработки и визуализации результатов вычислений. При построении графиков можно применять математические выражения, специальные функции и макросы. Инструмент Performance Analysis позволяет строить гистограммы для результатов статистического анализа по методу Монте-Карло. Вычислительные функции Measurements дают возможность быстро найти сложные зависимости и параметры схемы, например полосу пропускания, частоты среза и пр. (рис.21).

Предлагаемый в большей части Spice-симуляторов обычный анализ Монте-Карло позволяет проверить работу схемы при изменении параметров одного из компонентов. Например, задав минимальный и максимальный номинал резистора в пределах стандартного допуска  $\pm 10\%$ , а также шаг изменения номинала, можно получить семейство графиков. Но, к сожалению, это не дает возможности в полной мере проанализировать надежность и стабильность работы схемы.

К счастью, в PSpice предлагаются более продвинутые и полезные инструменты расширенного анализа схем, которые объединены в опцию PSpice Advanced Analysis. С помощью этих инструментов разработчики могут улучшить повторяемость и надежность проектов.

При работе над проектом у специалистов могут возникнуть различные вопросы:

- Прибор корректно работает в лаборатории, но будут ли работать серийно изготовленные устройства?
- Будет ли прибор корректно работать при скачках температуры, при отклонениях номиналов компонентов и старении компонентов?
- Перегружены ли отдельные компоненты?
- Откажут ли они при тестировании, эксплуатации?
- Есть ли в схеме слишком чувствительные блоки, которые могут вызвать проблемы в будущем?
- Какие компоненты скорее всего могут отказать при производстве прибора?

На все эти вопросы помогут ответить инструменты расширенного анализа PSpice, о функциях и возможностях которого расскажем в следующей статье.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Сергеев А.** Обзор и новые возможности OrCAD PSpice Designer 16.6-2015. – Материалы семинара.
2. Информационные материалы компании Cadence Design Systems.