

К. т. н. О. Н. НЕГОДЕНКО, д. т. н. В. А. ВОРОНИН, Д. В. ЗАРУБА

Россия, Таганрогский гос. радиотехнический университет  
E-mail: metbis@fep.tsure.ru

Дата поступления в редакцию  
01.06 2001 г.

Оппонент к. т. н. В. С. ГОЛУБ  
(НПФ "VD MAIS", г. Киев)

## ГЕНЕРАТОРЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА АНАЛОГАХ НЕГАТРОНОВ

*Показана возможность компенсации паразитных параметров преобразователей в автогенераторах, определены условия устойчивости колебаний при воздействии механических нагрузок.*

Генераторы с электромеханическими преобразователями являются источниками ультразвука, который широко используется в диагностических и технологических установках. Они могут использоваться как датчики физических величин. Известны пьезоэлектрические, магнитострикционные и электромагнитные преобразователи [1], которые могут быть как миниатюрными (источники ультразвука для исследования кровеносных сосудов, сенсоры для датчиков), так и больших габаритов (для преобразователей напряжения [2], стиральных машин, ультразвуковых паяльников, гидроакустических станций). Соответственно потребляемая генераторами мощность колеблется от единиц мВт до сотен Вт.

Максимальное излучение ультразвука наблюдается, если преобразователи работают на своей резонансной частоте. В некоторых устройствах (пьезодвигатели, датчики силы, давления, массы, паяльники) механическая нагрузка на преобразователь изменяется, что влияет на его резонансную частоту. В гидроакустических станциях, ультразвуковых паяльниках генераторы, с выхода которых сигнал подается на преобразователь, содержат цепи слежения за ходом резонансной частоты и цепи подстройки частоты генератора. Известны генераторы с кварцевыми пьезопреобразователями на мощных транзисторах, построенные по схеме емкостной или индуктивной трехточки и развивающие мощность в нагрузке в единицы Вт [3]. В таких генераторах при изменении механической нагрузки на преобразователь могут нарушаться условия генерации, поэтому они также нуждаются в цепях подстройки.

Избежать использования цепей слежения и подстройки при определенных условиях удается при построении автогенераторов на аналогах негатронов с S- или N-образными вольтамперными характеристиками (ВАХ), т. к. они обладают широкополосностью, в них проще создается запас по возбуждению. В этом случае при изменении механической нагрузки на преобразователь меняется частота генерируемых и излучаемых колебаний, но срыва колебаний можно избежать. Пьезопреобразователи обычно работают на частоте последовательного резонанса, магнитострикционные и электромагнитные преобразователи — на частоте параллельного резонанса, если скомпенсировать влияние статической емкости в первом случае и индуктивности обмотки — во втором [1, с. 119]. Маломощные высокочастотные генераторы с кварцевым пьезопреобразователем (резонатором) на аналогах негатронов с S-образной ВАХ описаны в [4]. Величина статической емкости у них невелика и может быть скомпенсирована собственной индуктивностью аналога негатрона (или не компенсироваться вообще). Маломощные высокочастотные генераторы с кварцевыми пьезопреобразователями на туннельных диодах, имеющих N-образную ВАХ, описаны в [5]. Здесь для развязки импедансов туннельного диода и источника питания по переменному току используется LC-фильтр, а статическая емкость не компенсируется. Мощные преобразователи из пьезокерамики имеют большую статическую емкость, которую нужно скомпенсировать, потому что она шунтирует активное сопротивление нагрузки. Генераторы с электромагнитными или магнитострикционными преобразователями [6] на аналогах негатронов пока не исследованы.

Целью работы является подбор таких аналогов негатронов для генераторов с электромеханическими преобразователями, которые позволяли бы работать на резонансных частотах преобразователей за счет компенсации их паразитных параметров, а также выявления условий, при которых не требуется подстройки.

ка частоты генераторов при изменении механической нагрузки на преобразователь.

Известно, что статическую емкость пьезопреобразователя можно скомпенсировать индуктивностью, а индуктивность обмотки электромагнитного или магнитострикционного преобразователя — емкостью [1]. Однако не все схемы генераторов допускают параллельное подключение к пьезопреобразователю катушки индуктивности, т. к. последняя закорачивает по постоянному току клеммы, к которым подключается пьезопреобразователь. Не всегда можно последовательно с обмоткой электромагнитного или магнитострикционного преобразователя включать компенсирующий конденсатор, т. к. последний препятствует протеканию постоянного тока. Эти обстоятельства подсказывают, какой аналог негатрона нужно использовать.

Перебор всех возможных вариантов показывает, что для преобразователя с компенсацией статической емкости разумно применять аналог негатрона с N-образной ВАХ, например, аналог N-транзистора [4]. У него формирование N-образной ВАХ основано на уменьшении тока базы транзистора с увеличением напряжения питания за счет использования полевого эффекта или за счет ответвления части тока базы в дополнительную цепь.

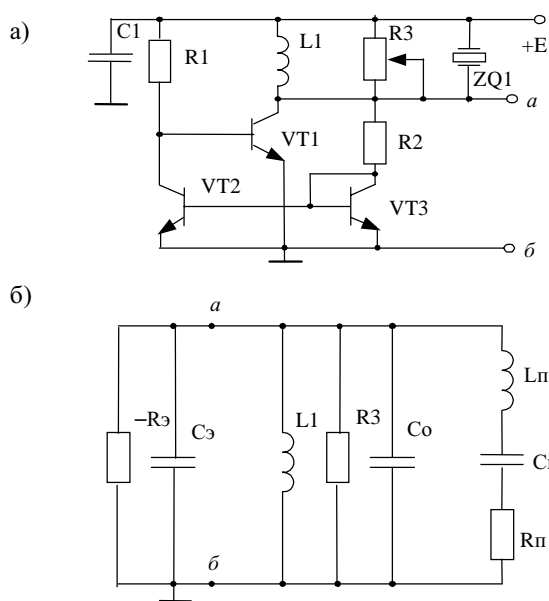


Рис. 1

На рис. 1, а показана схема аналога N-транзистора со вторым механизмом образования N-образной ВАХ между клеммами а и б при постоянном напряжении Е. Дополнительная цепь выполнена в виде токового отражателя на транзисторах VT2 и VT3. Для получения автогенератора между клеммой а и источником питания включается катушка индуктивности L1, резистор переменного сопротивления R3 и пьезопреобразователь ZQ1. Катушка L1 облегчает питание аналога негатрона по постоянному току и влияет на частоту генератора вместе с параметрами преобразователя ZQ1, резистор R3 обеспечивает формирование синусоидальной формы колебаний.

Эквивалентная схема генератора показана на рис. 1, б. Здесь Rэ и Cэ — эквивалентные активное отрицательное сопротивление и емкость аналога негатрона (формулы для них приведены в [4, с. 165]), Co — статическая емкость пьезопреобразователя, Lп, Cп, Rп — соответственно динамическая индуктивность, емкость и активное сопротивление пьезопреобразователя. Потери в катушке индуктивности L1 не учитываются вследствие их малости.

Из рис. 1, б видно, что генератор будет работать на частоте последовательного резонанса пьезопреобразователя  $f\pi = 1/(2\pi\sqrt{L\pi \cdot C\pi})$ , если параллельный контур, составленный Cэ, Co, L1, настроен на эту же

частоту. Колебания возникают при  $\left| \frac{-Rэ \cdot R3}{R3 - Rэ} \right| > Rп$ .

Когда резонансная частота параллельного контура ниже  $f\pi$ , то возможна генерация на частоте параллельного контура  $f\pi = 1/2\pi\sqrt{L1(Cэ + Co)}$ , если  $|-Rэ| < R3$ ,

но  $\left| \frac{-Rэ \cdot R3}{R3 - Rэ} \right| < Rп$ . В этом случае пьезопреобразователь работает как простой конденсатор. Если

$|-Rэ| < R3$  и, в то же время,  $\left| \frac{-Rэ \cdot R3}{R3 - Rэ} \right| > Rп$ , то на ко-

лебания параллельного контура накладываются колебания последовательного контура с частотой  $f\pi$ . Если  $f\pi > f\pi$ , то на колебания последовательного контура должны накладываться колебания параллельного контура, но этот вариант на практике не удалось наблюдать.

В эксперименте использовались транзисторы КТ315, C1=100 нФ, R1=22 кОм, R2=75 кОм, E=6 В. Шарообразный тонкостенный преобразователь имел наружный диаметр 72 мм, внутренний — 64 мм, обкладки нанесены с наружной и внутренней стороны, вывод от внутренней обкладки сделан через отверстие в шаре диаметром 20 мм (их два с диаметрально противоположных сторон), частота последовательного резонанса  $f\pi = 21$  кГц, сопротивление Rп=20 Ом, статическая емкость Co=38 нФ, максимальное сопротивление резистора R3=1 кОм, индуктивность катушки L1=1—2 мГн (необходимо 1,6 мГн). Выходное напряжение снималось с клеммы а. При изменении индуктивности L1 и сопротивления R3 удавалось наблюдать работу генератора на частоте последовательного резонанса пьезопреобразователя при синусоидальной форме колебания. При использовании катушки с L1=40 мГн на колебания параллельного резонанса накладывались колебания с частотой последовательного резонанса. Резистором R3 можно "сорвать" колебания с частотой последовательного резонанса.

Исследованная схема N-транзистора может быть привлекательна для реализации мощных генераторов, т. к. ток через основной транзистор VT1 много больше токов через транзисторы VT2 и VT3. Это сулит получение высоких коэффициентов полезного действия генераторов.

При использовании магнестрикционного или электромагнитного преобразователя (Рм) предлагается генератор строить на аналоге негatrona с S-образной ВАХ. Схема одного из таких аналогов приведена на рис. 2, а [4, с. 146]. Здесь R1=R2, R3=R4. Между клеммами а и б наблюдается ВАХ с участком отрицательного дифференциального сопротивления, причем рабочая точка при подаче напряжения питания E автоматически устанавливается посередине этого участка.

Эквивалентная схема генератора показана на рис. 2, б. Здесь Lэ, Rэ – эквивалентные индуктивность и активное отрицательное сопротивление аналога негatrona (формулы для Lэ, Rэ приведены в [4, с. 175]), C2 – емкость разделительного конденсатора (этот конденсатор предотвращает короткое замыкание по постоянному току между клеммами а, б при подключении обмотки преобразователя), Rc – сопротивление, отражающее потери энергии в конденсаторе C2, Lo и Ro – индуктивность и активное сопротивление обмотки преобразователя, Lп, Cп, Rп – динамические параметры преобразователя.

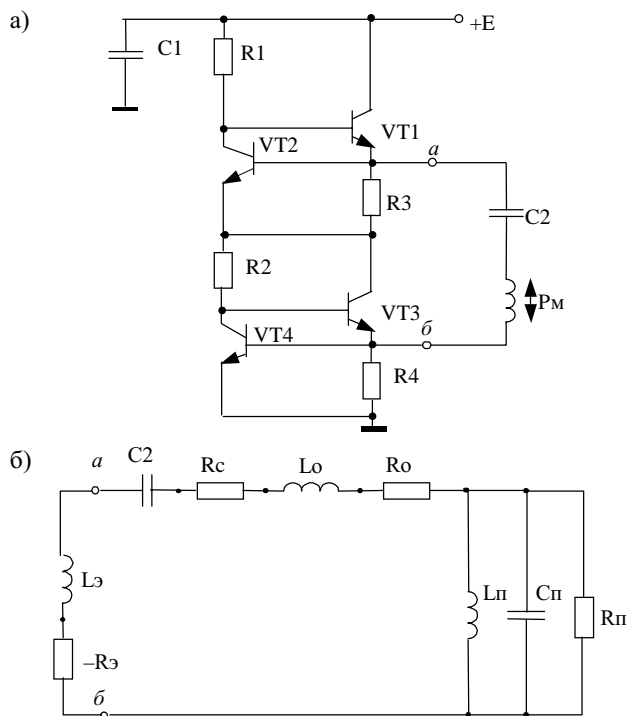


Рис. 2

Генератор будет работать на частоте параллельно-

го резонанса  $f_{\Pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{\Pi} \cdot C_{\Pi})}}$ , если последователь-

ный контур, составленный Lэ, Lo и C2, настроен на эту же частоту. Так как обычно известны  $f_{\Pi}$ , Lo, Lэ,

то величина  $C2 = \frac{1}{40 \cdot f_{\Pi}^2 \cdot (Lo + Lэ)}$ . Генератор работа-

ет при условии  $|Rc + Ro - Rэ| < R_{\Pi}$ .

В эксперименте применялись транзисторы КТ940 (VT1, VT3), КТ315 (VT2, VT4), R1=R2=12 кОм, R3=R4=37 Ом. В качестве преобразователя использовался камертонный

фильтр с резонансной частотой 1 кГц, Lo=920 мГн. Вход фильтра подключался к генератору, а выход — к осциллографу. Определенная по формуле величина емкости C2 (без учета Lэ) равна 27 нФ. Настройка в резонанс осуществлялась изменением емкости C2 или изменением напряжения источника питания (при этом меняется Lэ). Генератор работал при напряжении E=51—55 В. Такой генератор может служить не только источником ультразвука, но и источником стабильных колебаний. Построенные другим, более сложным, способом аналогичные источники стабильных колебаний описаны в [6, с. 239]. Расчет выходной мощности и КПД генераторов на используемом аналоге негatrona с S-образной ВАХ приведены в [4, с. 190], величина КПД зависит от Rп и превышает 50%.

Для получения ультразвуковых колебаний, следующих с определенным интервалом, в схеме рис. 1, а управляющие импульсы напряжения следует подавать на клемму резистора R1, предварительно отключенного от источника питания E. Можно использовать управляемые аналоги негatronов с S-образной ВАХ [4, с. 152].

Генераторы с магнестрикционными или электромагнитными преобразователями можно строить на аналогах негatrona с N-образной ВАХ. Эквивалентные схемы таких генераторов приведены на рис. 3 (резистор, регулирующий величину отрицательного сопротивления, не показан). В первом случае обмотка катушки преобразователя используется вместо катушки L1 (рис. 1). Если аналог негatrona

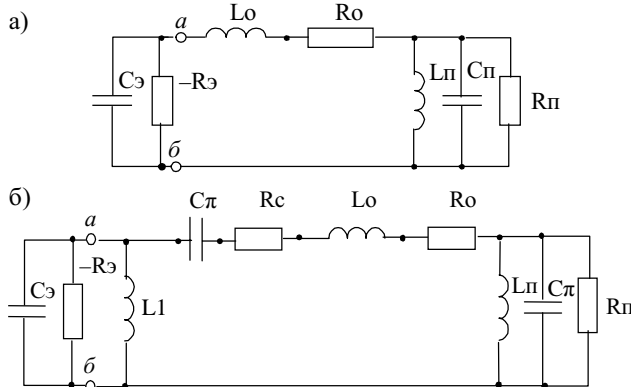


Рис. 3

обладает малой емкостью Cэ, а обмотка преобразователя имеет малую индуктивность Lo, то генератор будет работать, если  $|Ro - Rэ| < R_{\Pi}$ . При большом запасе по возбуждению ( $|Ro - Rэ| \ll R_{\Pi}$ ) колебания не будут срывать при воздействии на резонатор преобразователя механической нагрузки (конечно, в разумных пределах). Однако практически такой генератор трудно реализовать. Во втором случае (рис. 3, б) в схему вводятся два дополнительных элемента — L1 и Cp. Если контуры Cэ—L1, Cp—Lo настроены на частоту параллельного контура Lп—Cп и  $|Rc + Ro - Rэ| < R_{\Pi}$ , то возникает генерация. Здесь компенсируются паразитные параметры преобразователя (Lo) и аналога негatrona (Cэ), но система не обладает широкополосностью и будет чувствительна к изменениям ме-

ханической нагрузки на преобразователь. Кроме того, требуется настройка на единую частоту трех контуров, что не удобно.

Генераторы с пьезопреобразователями можно строить и на аналогах с S-образной ВАХ. Их эквивалентные схемы приведены на рис. 4. В первом случае, если  $L_э$  и  $C_о$  малы, то генератор возбуждается на частоте, близкой к частоте последовательного резонанса преобразователя при  $|R_э| > R_п$ . Именно такой случай рассмотрен в [4, с. 174]. При большом запасе по возбуждению ( $|R_э| \gg R_п$ ) генератор сохраняет работоспособность при изменении механической нагрузки на преобразователь, но емкость  $C_о$  не компенсируется. Такой генератор хорош для датчиков, пьезодвигателей. Во втором случае (рис. 4, б) вводятся два дополнительных элемента —  $C_р$  и  $L_к$ . Если контуры  $L_э—C_р$ ,  $L_к—C_о$  настроены на частоту последовательного контура  $L_п—C_п$ , то колебания возникают, если  $|R_э| > R_п$ . Здесь паразитные параметры преобразователя ( $C_о$ ) и аналога негатрона ( $L_э$ ) компенсируются, но система будет чувствительна к изменениям механической нагрузки на преобразователь. Кроме того, требуется настройка на единую частоту трех контуров, что не удобно. Работоспособность генераторов, реализованных по схемам рис. 3 и 4, подтверждена экспериментально.

Увеличение мощности генераторов осуществляется применением транзисторов с высокими рабочими токами. Возникающая при этом проблема получения достаточной величины модуля отрицательного сопротивления решается увеличением напряжения питания и номиналов тех резисторов, сопротивление которых пресчитывается в отрицательное.

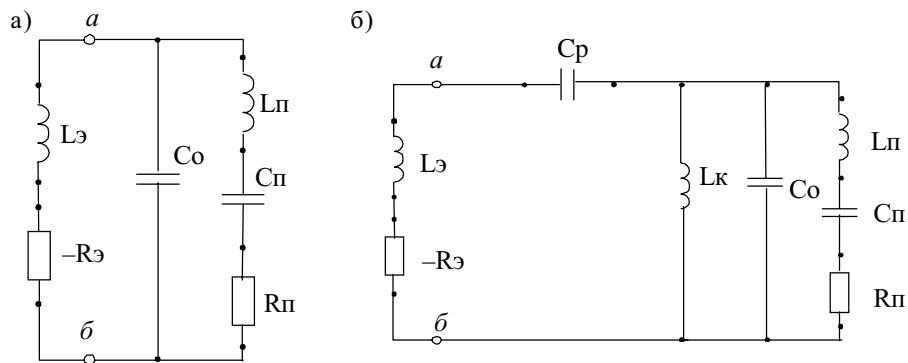


Рис. 4

Таким образом, показана возможность компенсации паразитных параметров электромеханического преобразователя в источниках ультразвука путем соответствующего выбора аналогов негатронов и введением в схему генераторов компенсирующих элементов; определены условия, при которых генераторы сохраняют работоспособность при изменении механической нагрузки на преобразователь.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Богородицкий В. В., Зубарев Л. А., Корепин Е. А., Якушев В. И. Подводные электроакустические преобразователи (расчет и проектирование). Справочник.— Л.: Судостроение, 1983.
2. Ерофеев А. А., Данов Г. А., Фролов В. В. Пьезоэлектрические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике.— М.: Радио и связь, 1988.
3. Чистяков И. Н., Судаков Ю. И., Барский Е. А. Мощный кварцевый автогенератор на комплементарном транзисторе // Электронная техника. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты.— 1987.— Вып. 3.— С. 57—62.
4. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негатроника.— Новосибирск: Наука, 1995.
5. Львович А. А., Гейсман Ю. В. Высокочастотные кварцевые генераторы на туннельных диодах.— М.: Связь, 1970.
6. Филатов Г. А. Малогабаритные низкочастотные механические фильтры.— М.: Сов. радио, 1974.

#### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

Украина  
г. Харьков  
23—26 сентября 2002 г.

Адрес Оргкомитета  
61166, Харьков, просп. Ленина, 14,  
ХНУРЭ, ИМО.  
Тел. (0572) 40-93-97. Факс (0572) 40-91-13.  
E-mail: imd@kture.kharkov.ua

### 8-я Международная научная конференция «ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА ПЕРЕДАЧИ, ПРИЁМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ» (ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, СЕТИ И ТЕХНОЛОГИИ. «ИИСТ-2002»)

#### Научные секции конференции

- |                                                                                |                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1. Фундаментальные исследования в области создания ИИСТ.                       | 4. Автоматизация проектирования и тестирование цифровых систем. |
| 2. Перспективные телекоммуникационные и компьютерные технологии развития ИИСТ. | 5. Устройства, средства и системы радиодоступа в ИИСТ.          |
| 3. Программно-аппаратные средства и технологии разработки ИИСТ.                | 6. Компонентная база аппаратных средств ИИСТ.                   |
|                                                                                | 7. Математические методы и модели разработки ИИСТ.              |
|                                                                                | 8. Безопасность информационных технологий.                      |