

УДК 621.382: 681.586.776

**В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; А. В. Осадчук, д. т. н., проф.; С. В. Барабан**  
**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ IGBT-VJT**  
**СТРУКТУРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ**

*В данной статье проанализировано современное состояние развития преобразователей температуры на основе пирозлектриков. Представлен и описан новый преобразователь температуры на основе транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Смоделированы вольт-амперная и частотная характеристики данного прибора в программной среде Pspice.*

**Ключевые слова:** биполярный транзистор с полевым управлением (БТПУ), IGBT, полярный биполярный транзистор, VJT, пирозлектрик, преобразователь температуры, автогенератор, структура с отрицательным сопротивлением, датчик мощности излучения (ДМИ), пиродетектор.

### Введение

Пирозлектрические материалы находят широкое применение в качестве сенсорных устройств разного назначения, детекторов и приемников излучений, датчиков теплотрических приборов. Используется главным образом их основное свойство – любой вид радиации, которая попадает на пирозлектрический образец, вызывает изменение его температуры и соответствующее изменение поляризации [1]. Основным входным действием на пирозлектрические преобразователи есть тепловое действие, при нескольких действиях – тепловое и механическое, тепловое и электрическое и так далее. Перечисленные действия независимо от их физической природы по характеру формирования электрического сигнала разделяются на генераторные и параметрические, в связи с чем эквивалентную схему пирозлектрического сенсора можно представить в виде параллельного (при измерении тока) или последовательного (при измерении напряжения) соединения конденсатора и генератора (источники тока или напряжения) [2], как показано на рис. 1.

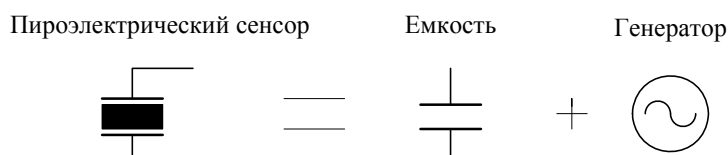


Рис. 1. Эквивалентная схема пирозлектрического сенсора

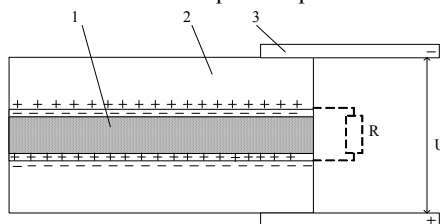


Рис. 2. Включение пирозлектрического преобразователя во внешнюю цепь

В пирозлектрическом преобразователе (рис. 2) полярный диэлектрик используется в виде пластины 1, покрытой металлическими электродами 2, к которым подсоединены внешние выводы 3. В результате электростатической индукции в электродах и внешних выводах потенциал внешних выводов совпадает по знаку с приростом связанного заряда на соответствующей стороне пирозлектрика. Пирозлектрик владеет объемной проводимостью, учтенной нагрузкой истекания  $R$  [3].

### Теоретические и экспериментальные исследования

Рассмотрим принцип превращения температуры в электрический сигнал. Структурная схема превращения в термочувствительном элементе большинства пьезоэлектрических устройств (рис. 3) состоит из трех этапов [4]:

1.  $W - \Delta T$ : тепловое действие  $W$  вызывает изменение температуры  $\Delta T$  пьезоэлектрика;
2.  $\Delta T - \Delta Q$ : изменение температуры  $\Delta T$  предопределяет появление зарядов  $\Delta Q$  на электродах пьезоэлектрика;



Рис. 3. Структурная схема пьезоэлектрических преобразователей

3.  $\Delta Q - \Delta U$ : заряд  $\Delta Q$  на электродах пьезоэлектрика создает разницу потенциалов  $\Delta U$ , значение которой зависит от собственной емкости пьезоэлектрика и импеданса нагрузки.

Пьезоэлектрические сенсоры, которые представляют собой кристаллы пьезоэлектриков с присоединенными выводами, обязательно нуждаются в схеме усиления исходного сигнала  $U$ . Чтобы усилить пьезоэлектрический сигнал для последующей обработки, используют два типа схем усиления: напряжение на нагрузке пьезоэлектрика (рис. 4а) и усиление исходного сигнала пьезоэлектрика по заряду (рис. 4б) [4, 5].

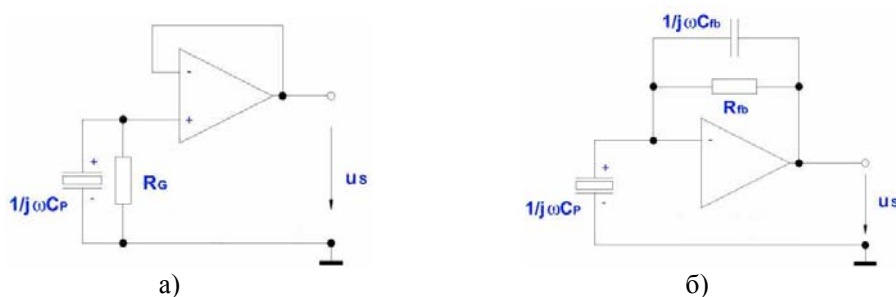


Рис. 4. Схемы предварительного усиления исходного сигнала пьезодетекторов:  
а) по напряжению; б) по заряду

В простом случае усилитель подсоединён к истоку полевого транзистора. Подзатворный резистор и полевой транзистор интегрированы в корпус сенсора. Резистор в кругу истока полевого транзистора размещен вне корпуса сенсора мощности излучения (см. рис. 5). Высокий уровень сигнала по отношению к шуму, как и простота схем является причиной широкого распространения сенсоров [6].

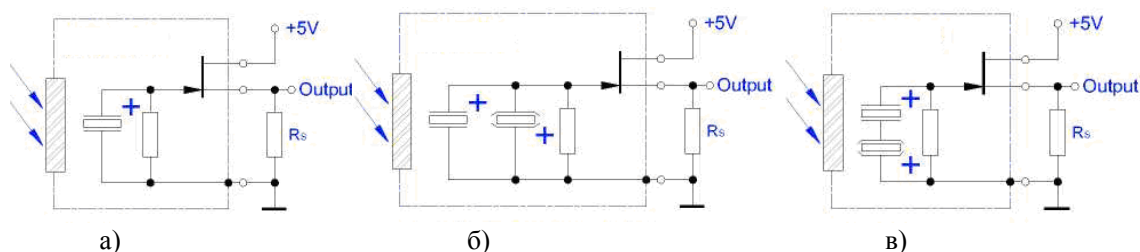


Рис. 5. Базовые схемы для усиления напряжения [7]: а) с одинарным пьезодетектором; б) с параллельным сочетанием пьезодетекторов; в) с последовательным сочетанием пьезодетекторов

На рис. 6 представлена завершенная схема для измерения тепловой мощности, которая содержит пьезоэлектрические сенсоры мощности излучения с усилением исходного напряжения, а также схему обработки исходного сигнала данных сенсоров [5].

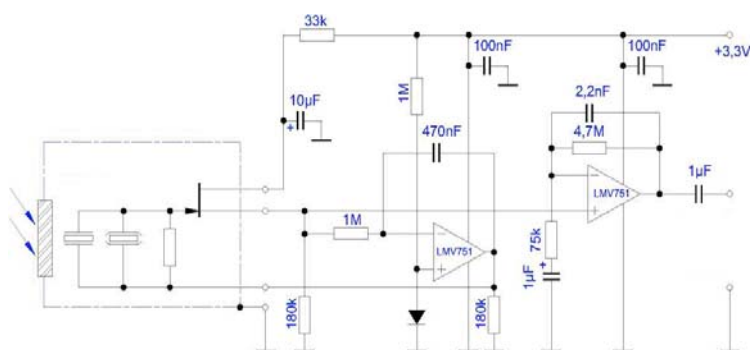


Рис. 6. Схема пирозлектрических сенсоров с схемами обработки исходного сигнала

Как видно из рис. 6, показанные устройства сложны в строении, содержат много электронных компонентов, которые влияют на точность измерения и стоимость измерительных устройств.

Усиление по заряду в схемах с пирозлектрическими элементами менее популярное, чем усиление по напряжению. Это связано, в первую очередь, еще с большей сложностью, чем в схемах по усилению исходного напряжения, схем обработки исходного сигнала. На рис. 7 представлены четыре основных схемы с предыдущим усилением по заряду исходного сигнала пирозлектрического сенсора [6].

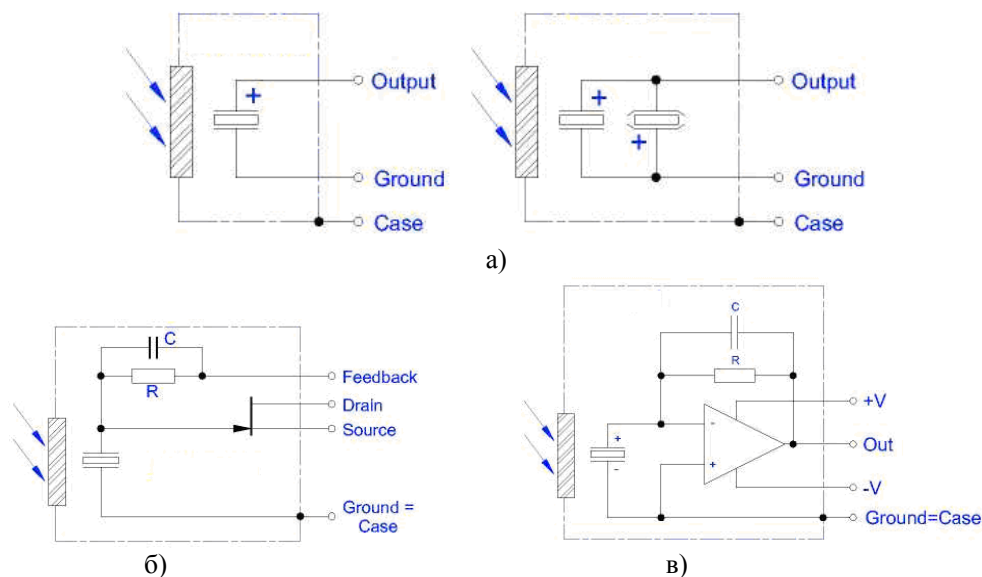


Рис. 7. Пирозлектрические детекторы с предварительным усилением исходного сигнала по току

На рис. 7 а представлены самые простые пирозлектрические детекторы, однако в них самый низкий уровень исходного сигнала по отношению к шумам пирозлектрика. На рис. 7 б, 7 в представлены схемы пиродетекторов с отрицательной обратной связью по заряду. Схема на основе операционного усилителя с цепью обратной связи (рис. 7 в) позволяет регулировать его коэффициент усиления. Как показано в [4], использование операционного усилителя приводит к значительному усилению чувствительности пирозлектрического сенсора, которая ограничивается условиями теплоизоляции и конструктивными параметрами пироприемника.

После усиления пирозлектрический сигнал нуждается в последующей обработке и превращении в удобную для анализа форму. На рис. 8 представлены схемы последующей обработки исходного сигнала с предварительным усилением тока компании Infracore [5].

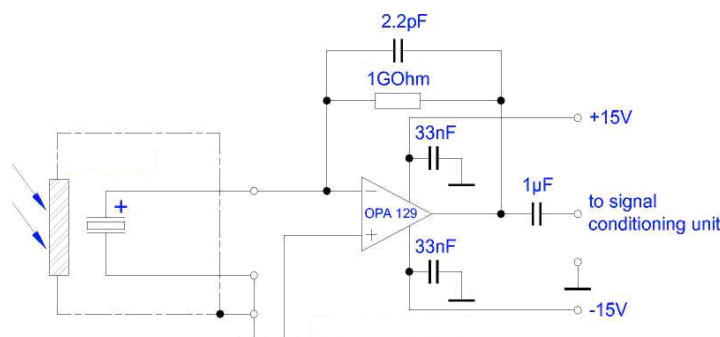


Рис. 8. Схема для усиления по заряду пьезоэлектрических детекторов

Рассмотрев методы измерения температуры на основе пьезоэлектриков, поданных в данной статье, можно сделать общий вывод о сложности измерения, а если проанализировать более детально, то получим:

1) низкая точность измерения, которая падает после каждого звена обработки исходного сигнала, какой уже идет с погрешностью predetermined особенностями строения пироматериалов и дополнительными, паразитными физическими эффектами, кроме пьезоэффекта, поскольку каждая схема, или усиления, или обработки, имеет собственную погрешность;

2) низкая экономичность устройства, predetermined наличием схем усиления, АЦП;

3) низкая помехоустойчивость;

4) невозможность передачи информации на расстояние.

В [8] найдено решение данных проблем и предложено использование преобразователей температуры на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. Данные устройства в своем строении совмещают активные интегральные конструкции с использованием тонких пьезоэлектрических пленок и автогенераторов на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением. В данной статье мы проанализируем один из таких преобразователей температуры, а также проведем моделирование его характеристик.

В качестве первичного преобразователя из [9] используем биполярный транзистор с полевым управлением (БТПУ или IGBT – insulate gate bipolar transistor) с нанесенными на базу пленкой пьезоэлектрика  $PbTiO_3$  (ПТО) и черным золотом, который подан на рис. 9.

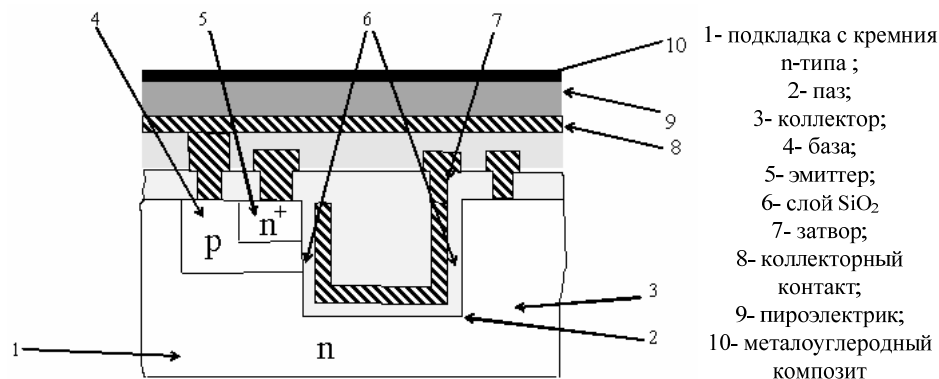


Рис. 9. IGBT структура с пленкой пьезоэлектрика, покрытой металлоуглеродным композитом, в цепи базы

Данный элемент является датчиком мощности излучения (ДМИ) и используется в качестве сенсора температуры в системе автоматизированного управления и контроля

параметров печи ИЧ-сушения изделий электронной техники [10]. В основе ДМИ лежит биполярный транзистор с полевым управлением (IGBT). Рассмотрим строение и принцип работы ДМИ более детально. Даная IGBT структура содержит чувствительный элемент (ЧЭ) – поглотитель излучений, в роли которого в данном случае выступает пленка черного золота, управляющий элемент (УЭ) – пирозлектрический преобразователь, в роли которого в данном случае выступает нанесенная на базу пленка пирозлектрика  $PbTiO_3$  (РТО), и исполнительный элемент (ИЭ) – БТПУ. Работа ДМИ сопровождается изменением исходного параметра ИЭ в результате изменения потенциала на базе БТПУ, которая электрически соединенная с пирозлектриком. Нагревание пирозлектрика происходит за счет превращения мощности сигнала в теплоту с помощью ЧЭ [35]. Как видно из рис. 9 [9], измерительный первичный преобразователь содержит подкладку 1 из кремния n-типа с ориентацией (100), на которой выполнена изопланарная транзисторная структура с боковой  $SiO_2$  – изоляцией, в которой с помощью анизотропного травления выполнен паз 2, дно которого расположено в области коллектора 3, а области базы 4 и эмиттера 5 ограничены одной из стенок паза. На стенках паза сформирован слой  $SiO_2$  – 6 и дополнительный полевой электрод – затвор 7. На коллекторный контакт 8 последовательно наносятся слои пирозлектрика 9 и металлоуглеродного композита 10, которые осуществляют превращение мощности сигнала.

Предлагаем включить данный БТПУ в схему с биполярным транзистором для образования структуры с отрицательным сопротивлением с целью построения автогенератора. Схема такого измерительного устройства подана на рис. 10.

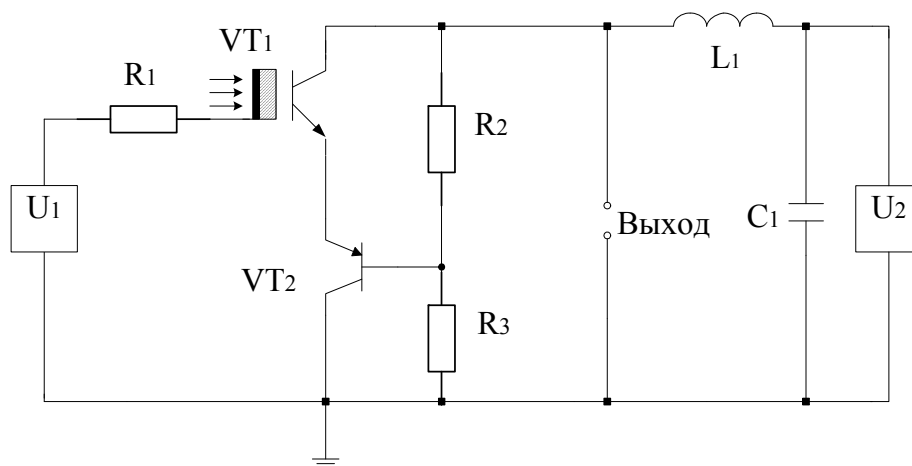


Рис. 10. Преобразователь температуры на основе IGBT-BJT структуры с отрицательным сопротивлением

Как видно из рис. 10, устройство содержит первый источник напряжения  $U_1$ , который присоединен одним полюсом к затвору IGBT  $VT_1$  с напыленными на базу пленкой пирозлектрика и поглотителем излучения, а другим полюсом – к коллектору BJT  $VT_2$ , который подсоединен к заземлению. Эмиттер IGBT  $VT_1$  соединен с эмиттером BJT  $VT_2$ , а коллектор IGBT  $VT_1$  подсоединен к пассивной индуктивности  $L_1$ , база BJT  $VT_2$  подсоединена между последовательно соединенными резисторами  $R_2$  и  $R_3$ , которые другими полюсами параллельно подсоединяются к IGBT-BJT структуре, а также параллельно транзисторам  $VT_1$  и  $VT_2$  соединена пассивная индуктивность  $L_1$  и конденсатор  $C_1$ , и второй источник напряжения  $U_2$ .

Устройство работает следующим образом. В начальный момент времени тепловое излучение не действует на поглотитель излучения (ЧЭ, пленка черного золота). Повышаем напряжение источников напряжения  $U_1$  и  $U_2$  до величины, когда на электродах коллектор–коллектор IGBT  $VT_1$  и BJT  $VT_2$  возникает отрицательное сопротивление, которое обуславливает возникновение электрических колебаний в контуре, образованном

последовательным включением полного сопротивления с емкостным характером на электродах коллектор–коллектор БТПК  $VT_1$  и биполярного транзистора  $VT_2$ , и индуктивного сопротивления пассивной индуктивности  $L_1$ . Конденсатор  $C_1$  предотвращает прохождение переменного тока через второй источник напряжения  $U_2$ . При действии теплового излучения на БТПУ оно поглощается плёнкой чёрного золота. Поглощённое излучение передается на напыленную пленку пирозлектрика  $PbTiO_3$  (РТО) на базу БТПУ. Тепловое действие мощности излучения  $W$  вызывает изменение температуры  $\Delta\dot{O}$  пирозлектрика ( $W \rightarrow \Delta T$ ). Изменение температуры  $\Delta\dot{O}$  предопределяет появление зарядов  $\Delta Q$  на электродах пирозлектрика ( $\Delta T \rightarrow \Delta Q$ ). Заряд  $\Delta Q$  на электродах пирозлектрика создает разницу потенциалов  $U$  ( $\Delta Q \rightarrow U$ ), которая добавляется к напряжению, которое существует на электродах база–эмиттер БТПУ  $VT_1$  и изменяет значение емкости колебательного контура, образованного последовательным включением полного сопротивления с емкостным характером на электродах коллектор–коллектор IGBT  $VT_1$  и ВJT  $VT_2$  с индуктивным сопротивлением пассивной индуктивности  $L_1$ . Это вызывает изменение резонансной частоты колебательного контура, которое отображается на выходном частотном сигнале устройства.

Проведем моделирование автогенератора преобразователя температуры на основе IGBT-VJT структуры с отрицательным сопротивлением. Для моделирования данного устройства воспользуемся пакетом программ Orcad Family Release 9.2. В качестве БТПУ возьмем транзистор марки APT25GF100BN, а в качестве биполярного транзистора – BC857A. На рис. 11 представлено окно программной среды Orcad Family Release 9.2 со схемой исследуемого устройства.

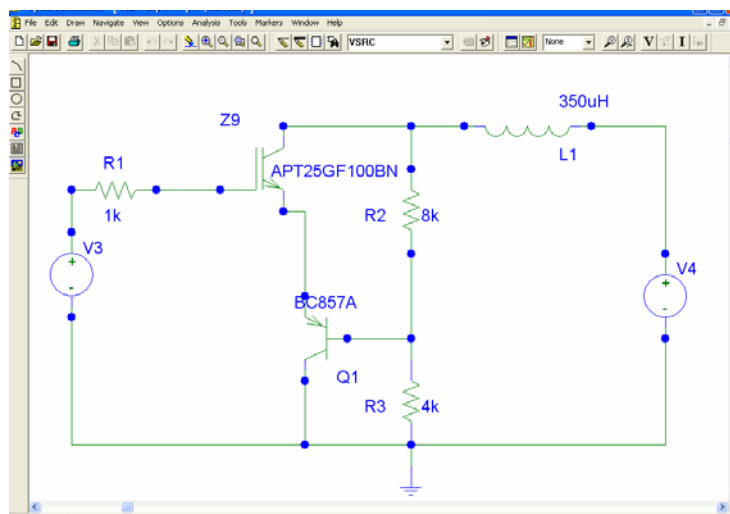


Рис. 11. Схема автогенератора, образованного на основе соединения БТПУ и биполярного транзистора

На рис. 12 представлено семейство вольт-амперных характеристик исследуемого автогенераторного устройства, полученных в результате моделирования в Orcad Family Release 9.2.

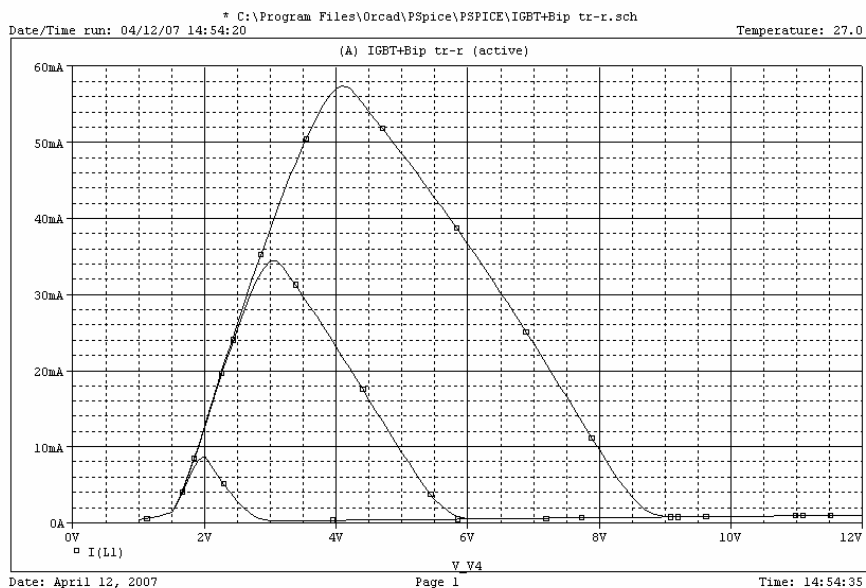


Рис. 12. ВАХ автогенератора при разных значениях напряжения управления

На рис. 13 представлена частотная характеристика автогенератора исследуемого преобразователя температуры, полученная в программной среде Pspice.

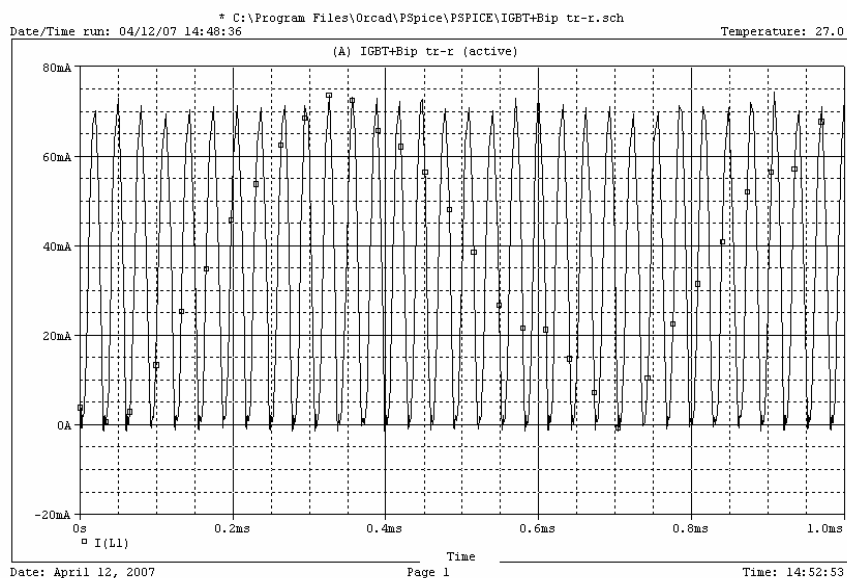


Рис. 13. Частотная характеристика автогенератора, полученная в Pspice

Проведем короткий анализ полученных результатов. Благодаря программной среде Pspice, которая является составной частью пакета программ Orcad Family Release 9.2 промоделировано работу автогенератора преобразователя температуры на основе БТПУ-биполярной структуры с отрицательным сопротивлением. В результате получено семейство вольт-амперных характеристик и частотная характеристика исследуемого устройства. График ВАХ при разных значениях напряжения управления приведен на рис. 12. Анализ графиков проведем по основным участкам вольт-амперной характеристики. Как видно из рис. 12, на растущем участке ВАХ все почти одинаковые, в некотором промежутке даже

сливаются. Это свидетельствует о незначительном влиянии температуры на преобразователя в данном диапазоне напряжения (1 - 3 В). Обратим внимание на пики или переломные участки ВАХ. Наибольшее отклонение графиков наблюдается именно на этом участке. С повышением температуры пик резко поднимается. Значит, температура сильно влияет на значение тока, при котором состоится "перелом" и начнется нисходящий участок, который отвечает образованию отрицательного сопротивления в транзисторной структуре. Это наиболее термочувствительный участок. Нисходящий участок ВАХ представляет наибольший интерес для разработчиков, поскольку он определяет диапазон образования генерации колебаний в транзисторной структуре с отрицательным сопротивлением. Как видно из рис. 12, данный участок достаточно зависит от температуры. Если рассмотреть путь рабочей точки, то очевидно, что с повышением температуры рабочая точка линейно поднимается вверх. Линейная зависимость рабочей точки от действия температуры и позволяет использовать данный преобразователь для измерения температуры.

### Выводы

Проанализировав физические основы работы пиросенсоров, существующих методов измерения температуры на основе пироэлектриков, авторами предложено новое устройство для измерения температуры на основе IGBT-VJT структуры с отрицательным сопротивлением, а также была смоделирована работа данного устройства в программной среде Pspice, в результате чего получено ВАХ и частотная характеристика.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Струков Б. А. Пироэлектрические материалы: свойства и применения // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – №5. – С. 96 – 104.
2. Виглеб Т. Датчики. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
3. Гаврилова Н. Д. Пироэлектричество / Данилычева М. Н., Новик В. К. – М.: Сов. рад., 1989. – 154 с.
4. Новик В.К. Пироэлектрические преобразователи / Гаврилова Н.Д., Фельдман Н.Б. – М.: Советское радио, 1979. – 176 с.
5. Pyroelectric detectors. Single element detectors. Basic line. – Dresden: Infra Tech GmbH, 1999. – 9 с.
6. Сигов А. С. Сегнетоэлектрические тонкие пленки в микроэлектронике // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №10. – С. 83 – 91.
7. Pyroelectric infrared sensor & sensor module. Catalog № S21E-5. – Tokyo: Murata Manufacturing Co., Ltd., International Division, 2002. – 18 с.
8. Осадчук В. С. Розробка мікроелектронних перетворювачів теплової потужності у частоту на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Осадчук О. В., Барабан С. В., Ільченко О. М. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008 – №1. – С. 133 – 139.
9. Кисельов Є. М. Інтегровані датчики потужності випромінювань на основі комбінованих твердотільних структур: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук; спец. 05.27.01 «Твердотільна електроніка»/ Є. М. Кисельов; Нац. тех. ун-т Укр. «КПІ». – Київ, 2006. – 20 с.: 8 іл. – Бібліогр.: С. 17 – 18.
10. Костенко В. Л. Особенности построения корпоративных сетей интеллектуальных датчиков параметров технологических процессов / Швец Е. Я., Максименко А. В., Киселев Е. Н. / Металлургия (сб. научных трудов) / отв. ред. Колесник Н. Ф., Колобов Г. А. – Запорожье: ЗГИА, 2003. – Выпуск 8. – С. 146 – 148.

**Осадчук Владимир Степанович** – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электроники, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

**Осадчук Александр Владимирович** – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой радиотехники, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

**Барабан Сергей Владимирович** – аспирант кафедры радиотехники, e-mail: akakieva@gmail.com. Винницкий национальный технический университет.