

УДК 519.624:624.044:624.15

А. В. Осадчук, д. т. н., проф.; Р. В. Криночкин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЕМКОСТИ К ЧАСТОТНОМУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЮ ТОЛЩИНЫ

В работе изложены результаты исследования влияния величины и места подключения измерительной емкости к частотному преобразователю толщины на основе отрицательного сопротивления. Приведена методика получения функции преобразования, диапазона измерения и чувствительности с помощью компьютерного эксперимента. Обоснован выбор оптимального варианта включения на основе анализа полученных результатов.

Ключевые слова: измерение толщины, частотные генераторы, отрицательное сопротивление.

Вступление

В связи с развитием нанотехнологий вопрос определения метрологических параметров покрытий приобретает в современной технике чрезвычайную важность. Поэтому не вызывает сомнения необходимость дальнейшего расширения возможностей применяемых средств измерения толщины. Однако необходимо отметить, что в условиях насыщенного рынка недостаточно создать продукт высоких метрологических качеств. Крайне необходимыми для успешного продвижения являются экономические и утилитарные показатели прибора: низкая себестоимость, простота и надежность.

Главной идеей, которая положена в основу новых измерителей толщины, было обеспечение разнопланового набора характеристик, которые позволили бы улучшить общее качество измерения, и открыли бы путь к массовому использованию приборов на производстве. Эти характеристики можно сгруппировать в три отдельных направления: экономичность (дешевизна и простота), метрологические качества (чувствительность, помехоустойчивость, малый минимальный порог измерения), практическое использование (технологичность и способность к измерению без остановки техпроцесса).

Исходя из вышесказанного на основе проведенного в работе [1] анализа, перспективными в соответствии с поставленными критериями представляются частотные преобразователи, основанные на отрицательном сопротивлении [2] в паре с емкостным первичным сенсором [3].

Можно выделить следующие преимущества такого сочетания [4 – 6]:

С-сенсор

- высокая стабильность
- линейность
- *простота*
- *низкая себестоимость*
- *высокая технологичность*

Частотный преобразователь

- высокая чувствительность и точность
- широкий диапазон измерений
- помехоустойчивость выходного сигнала
- *простота*
- *низкая себестоимость*
- *высокая технологичность*

Измерительная система с частотным преобразователем на отрицательном сопротивлении (рис. 1) работает следующим образом: изменение измеряемой величины (толщины) приводит к изменению суммарной диэлектрической проницаемости измерительного зазора или геометрических размеров первичного сенсора (конденсатора), который превращает ее в аналоговый сигнал (т. е. в изменение емкости), этот сигнал влияет на внутренние параметры частотного преобразователя с отрицательным сопротивлением (ЧПВО), результатом чего является изменение частоты генерации выходного сигнала.

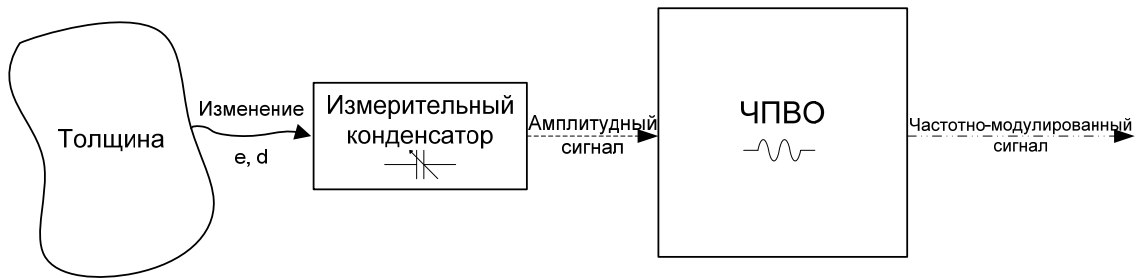


Рис. 1. Принцип работы частотного преобразователя толщины на отрицательном сопротивлении

Непосредственная схема ЧПВО в качестве основного структурного звена содержит транзисторную структуру с отрицательным сопротивлением, которое выполняет функцию эквивалентной емкости в колебательном резонансном LC-контуре. Причем величина этой емкости управляется изменением входного сигнала, таким образом, достигается корреляция между измерительным аналоговым сигналом и выходной частотой генерации.

Основной целью данного исследования выступает определение оптимального места подключения первичного сенсора к ЧПВО, на примере двух конкретных разновидностей преобразователя (рис. 2). Принципиальная схема исследуемой транзисторной структуры состоит из 4 узлов (не считая подключения конденсатора защиты C_3), поэтому возможно 6 различных вариантов (схем) подключений измерительной емкости [7].

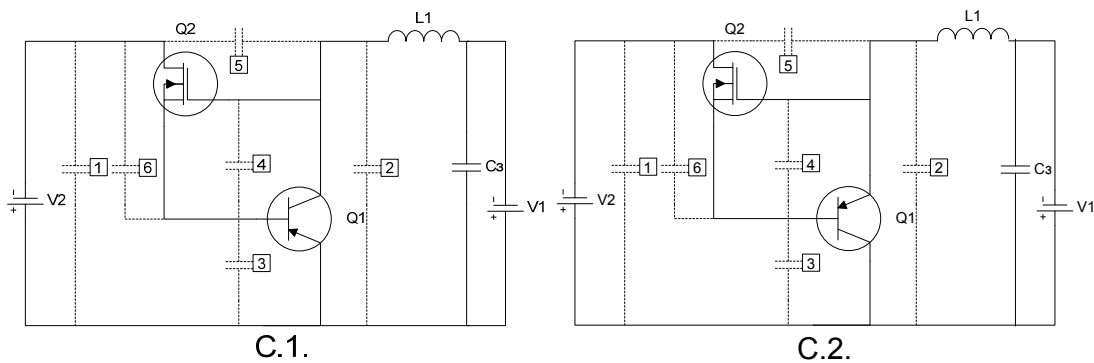
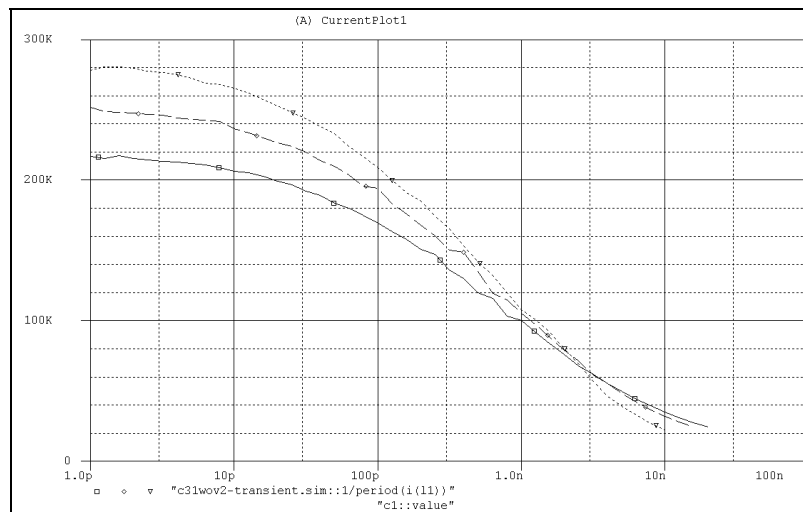


Рис. 2. Варианты схем-включений емкостного чувствительного элемента

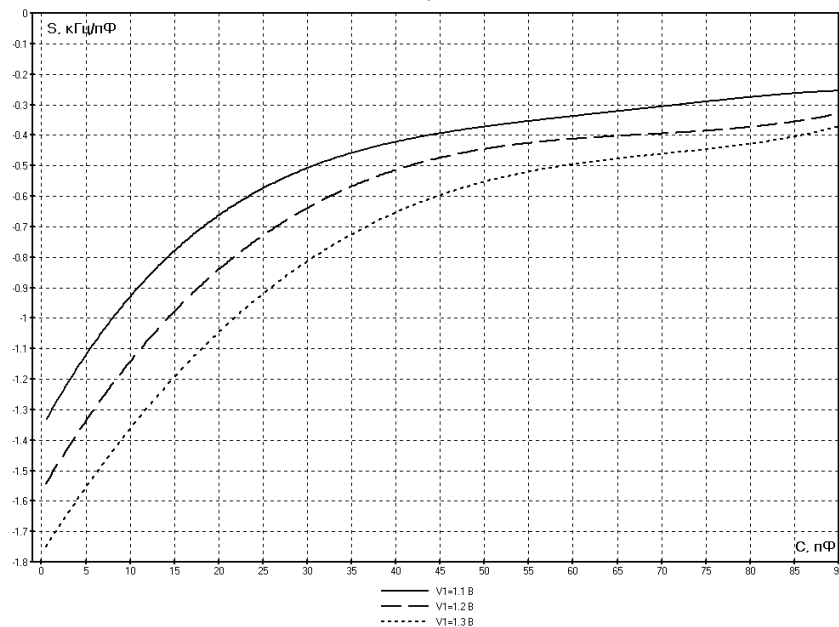
Инструменты исследования

В качестве основного программного приложения для моделирования разрабатываемых схем-гипотез был выбран широко используемый пакет OrCAD на основе языка описания и моделирования электронных схем PSpice A/D 16.0 [8, 9]. Режим параметрического моделирования в данном пакете позволяет проводить компьютерный эксперимент в режиме работы схемы с изменением емкости измерительного конденсатора. При этом для каждого такого изменения находится соответствующее ему изменение выходной частоты генерации при различных значениях напряжения питания источника. Это позволяет определить диапазон измерения, построить в графическом виде (по точкам) зависимость частоты генерации и чувствительности (как производной функции преобразования) от емкости и таким образом сделать выводы о дальнейшей возможности использования преобразователя в том или ином измерительном диапазоне.

Покажем для примера результаты анализа схемы C.1.4 (четвертое включение на схеме 1) (рис.3). Три ветви семейства на каждой из представленных зависимостей возникают потому, что моделирование проводилось с тремя различными напряжениями источника $V1 = 1.1-1.3$ В (для определения влияния изменения $V1$ на работу схемы).



а)



б)

Рис. 3. а) зависимость частоты генерации схемы С.1.4 от емкости измерительного конденсатора;
 б) чувствительность преобразования схемы С.1.4 в диапазоне от 1 пФ до 90 пФ

Влияние изменения измерительной емкости C_1 , которая подключена по схеме 1.4:

- в диапазоне 1 пФ - 35 нФ существует соответствующее изменение генерации, которая носит стабильный характер и может быть использована для измерительных целей;
- в диапазоне свыше 35 нФ генерация отсутствует.

Анализ и обработка полученных результатов

Полученные описанным способом данные заносятся в совокупную таблицу 1. Надо сказать, что часть из представленных схем почти нечувствительна к изменению емкости или не имеет определенной закономерности такого изменения, поэтому данные таких схем в таблицу не вносятся. Заметим также, что чувствительность приводится без учета ее знака (положительная или отрицательная), поскольку знак указывает лишь на направление изменения частоты генерации (рост или убывание).

Таблица 1.

Влияние емкости на работу ЧПВО

	Номер схемы					
	C.1.2	C.1.4	C.1.5	C.2.2	C.2.4	C.2.5
Максим. диапазон измерения	1 пФ 300 мкФ	1 пФ 55 нФ	1 пФ 30 мкФ	1пФ 1мкФ	1пФ 1нФ	1пФ 1мкФ
Максим. чувствительн., кГц/пФ	0.6	2	0.4	250	365	197
Диапазон перестройки, кГц	280 – 2	280 – 20	280 – 20	4500 – 20	5000 – 40	5000 – 20
Максимальная чувствительность при соответствующих значениях C, кГц/пФ						
1 пФ	-	2	-	251	365	197
10 пФ	0.5	1.3	0.4	67	76	70
100 пФ	0.205	0.41	0.25	8	8.2	8
1 нФ	58E-03	167E-03	80E-03	451E-03	362E-03	422E-03
10 нФ	11E-03	25E-03	14E-03	18E-03	-	17E-03
100 нФ	1.90E-03	-	2.25E-03	0.629E-03	-	0.604E-03
1 мкФ	260E-06	-	-	18E-06	-	18E-06
10 мкФ	28E-06	-	-	-	-	-
100 мкФ	2.80E-06	-	-	-	-	-

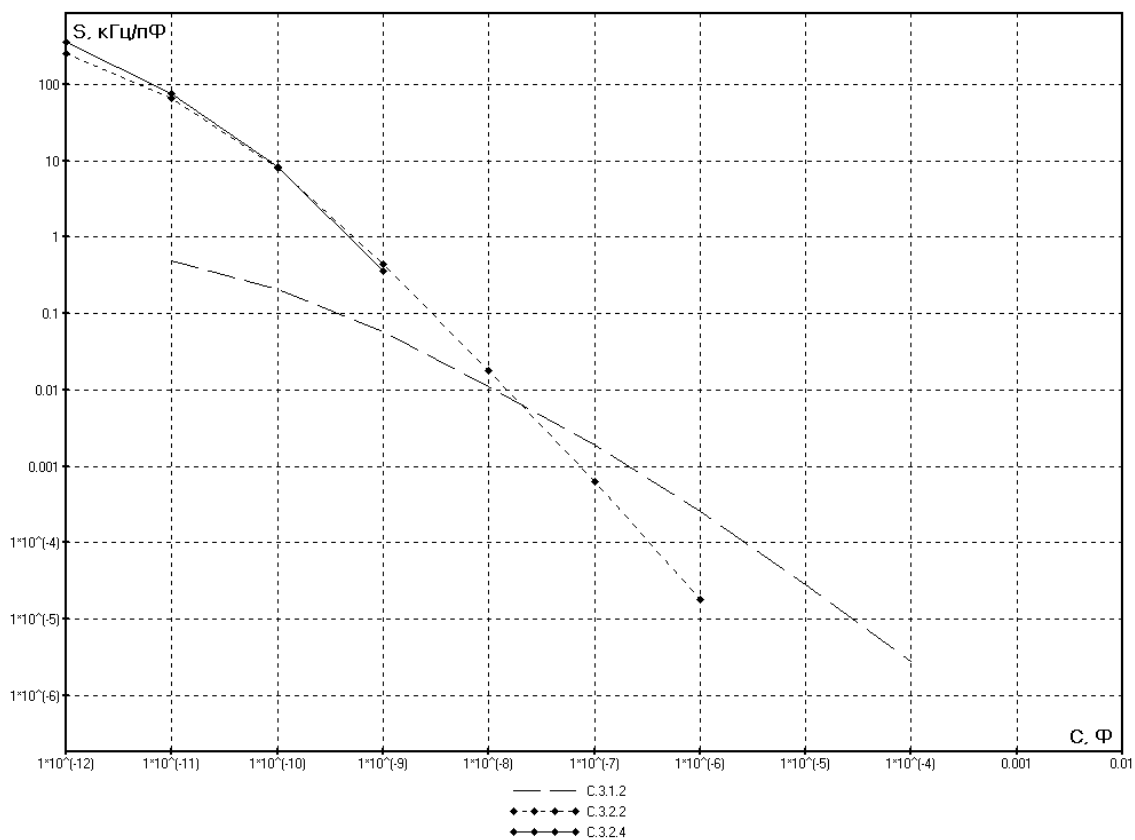


Рис. 4. Диаграмма соотношения «чувствительность-диапазон измерения»

На основе данной таблицы строится диаграмма соотношения «чувствительность-диапазон

измерения» (рис. 4). При этом по оси абсцисс откладывается определенное значение емкости из диапазона измерения, по оси ординат - соответствующее ему значение чувствительности в этом диапазоне. Данная диаграмма позволяет сравнить схемы разных включений между собой и определить оптимальный для заданных условий вариант подключения внешнего сенсора.

Исходя из приведенных зависимостей, мы можем сделать вывод, что наибольшей чувствительностью среди схем первой группы обладает включение С.1.4, а максимальным измерительным диапазоном - С.1.2.

Что касается схем второй группы, то сравнение С.2.2 и С.2.4 показывает, что вторая обладает преимуществами лишь в районе единиц - сотен пикофард. Первая же имеет значительно больший диапазон измерения и чувствительность при всех других значениях. Еще одним преимуществом схемы С.2.2 является низкая зависимость ее параметров от изменения V_1 , а следовательно и малое влияние случайных девиаций напряжения источника питания. Соответственно среди схем второй группы рекомендуется использовать более универсальную схему С.2.2, лишь в том случае, когда необходимо получить повышенную чувствительность в диапазоне до 100 пФ - С.2.4.

Сравнивая схемы групп 1 и 2, можно заметить значительно большую чувствительность схем второй группы при низких емкостях (менее 10 нФ), однако в субмикрофардном диапазоне их чувствительность становится настолько же меньше, а при дальнейшем росте емкости схемы группы 2 вообще выходят из автоколебательного режима, и генерация прерывается.

Итак, подводя итог, можно рекомендовать к использованию в зависимости от режима работы такие схемы включений:

- для измерений от 1 пФ до 10 нФ – схема С.2.2;
- для измерений более 10 нФ до 10 мкФ – схема С.1.2;
- специальный высокочувствительный вариант для 1 - 100 пикофард – схема С.2.4;

Для улучшения наглядности указанных зависимостей введем понятие нормированной диапазонной чувствительности, что с учетом уменьшения чувствительности при росте емкости (df/dC имеет отрицательный знак), запишется следующим образом:

$$Sc = \frac{S \cdot C}{F_b},$$

где S - чувствительность при емкости C , а F_b - нормировочная частота 1 МГц.

Эта безразмерная величина численно равна чувствительности схемы при изменении емкости первичного преобразователя на единицу соответствующего диапазона (МГц/мкФ, МГц/нФ т.п.). Таким образом, она позволяет более четко оценить чувствительность схемы в любом диапазоне измерения. Особенно удобно использовать Sc в описании схем, в которых возможное изменение значений чувствительности достигает многих порядков, поскольку она позволяет показать изменение чувствительности без применения логарифмического масштаба по оси ординат и таким образом более точно сравнивать различные варианты включений. Графические зависимости нормированной диапазонной чувствительности для исследуемых схем, показанные на рис. 5, наглядно подтверждают сделанные выводы о применимости схем включений.

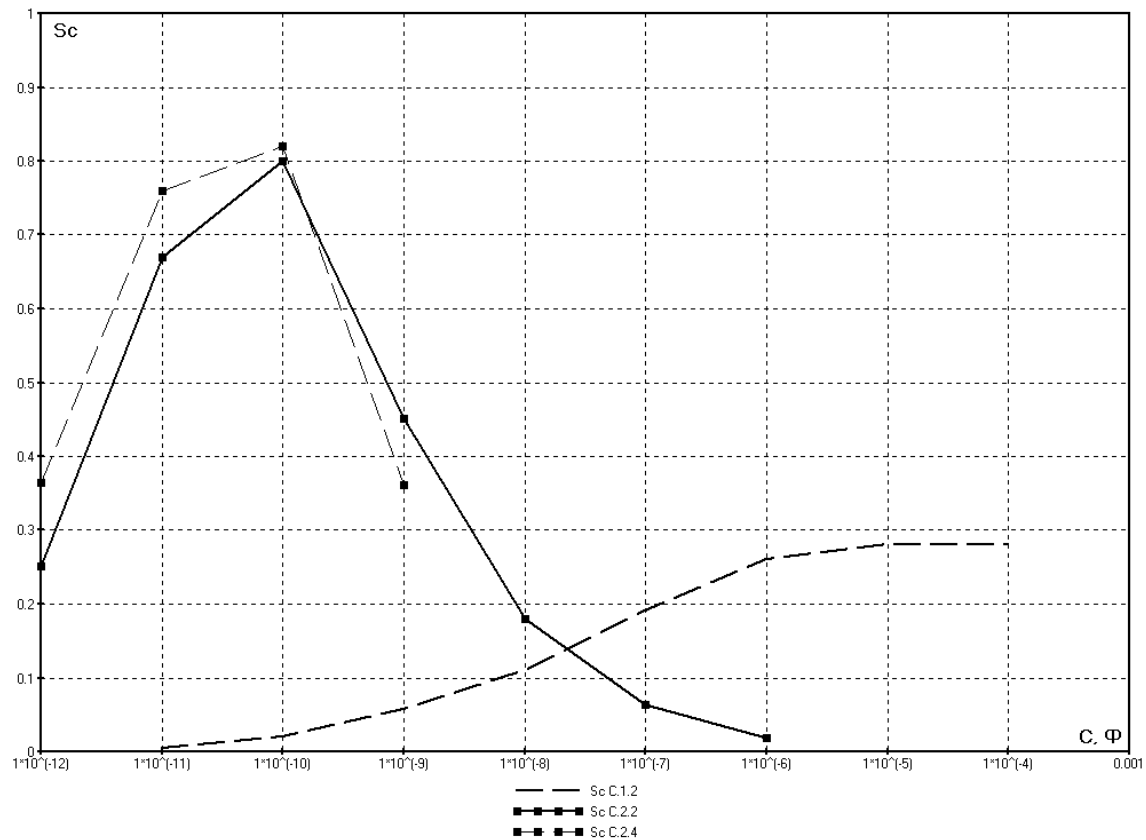


Рис. 5. Нормированная диапазонная чувствительность

Выводы

1. В данной работе представлены результаты компьютерного эксперимента по моделированию работы емкостного частотного измерителя толщины на отрицательном сопротивлении при различных вариантах подключения измерительного конденсатора.
2. Разработана методика получения для устройства функции преобразования, диапазона измерения и чувствительности в отношении изменения измерительной емкости.
3. Определены и подсчитаны критерии оптимальности для сравнения включений на основании использования диаграмм соотношения «чувствительность – диапазон измерения» и нормированной диапазонной чувствительности. Обоснован выбор оптимального варианта включения измерительной емкости к частотному преобразователю на отрицательном сопротивлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осадчук О. В. Проблеми вимірювання товщини нанесеного покриття та методи підвищення його точності / О. В. Осадчук, Р. В. Кривочкін // Нові Технології. – 2009. – №1. – С. 102 – 105. – ISSN: 1810-3049
2. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця: ВНТУ, 2004 – 208 с.[1]
3. Гриневич Ф. Б. Измерительные компенсационно мостовые устройства с емкостными датчиками / Ф.Б. Гриневич, А. И. Новик.; АН УССР, Ин-т Электродинамики. – Киев: Наукова думка. – 1987. – 112 с. – Библиогр.: с.105-110 (109 назв.).
4. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С Осадчук, О. В.Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 275 с. – ISBN 966-7199-67-3.
5. Струнский М. Г. Бесконтактные емкостные микрометры / М. Г. Струнский, М. М. Горбов-Л.: Энергоатомиздат: Ленинградское отд-ние, 1986. – 136 с.: ил.

6. Иоссель Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1981. – 288 с.
7. Осадчук О. В. Вплив зовнішньої вимірювальної ємності на ЧПВО / О. В. Осадчук, Р. В. Криночкін // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009): матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції, Вінниця, 8-10 жовтня 2009 року. – Вінниця, 2009 . – Частина 2. – С.78
8. Болотовский Ю. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга/ Ю. И. Болотовский, Г. И. Таназлы – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 200 с. — (Серия «Библиотека студента»). - ISBN 5-98003-178-2
9. Хайнеман Р. Моделирование работы электронных схем / Р. Хайнеман. – М.:ДМК-Пресс, 2005. – 327 с.– (Серия «Проектирование»).

Осадчук Александр Владимирович – д. т. н., профессор, заведующий каф. радиотехники.

Криночкин Роман Владимирович – аспирант кафедры радиотехники. Винницкий национальный технический университет.