

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.382

doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-8

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МДП-СТРУКТУРЫ

В. М. Чайковский

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
radiolokaci@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Информативность процесса измерения параметров МДП-структуры в максимальной степени определяется конфигурацией системы измерения, осуществляющей преобразование параметров МДП-структуры, как пассивного объекта в активные величины. *Материалы и методы.* Предлагается построение измерительной схемы из двух последовательно соединенных операционных усилителей, охваченных общей обратной связью по переменному току. Конфигурация измерительной схемы обосновывается методом инвариантного преобразования и с помощью основ теории усилителя постоянного тока, с использованием преобразования Лапласа. *Результаты.* Проведенный сравнительный анализ передаточной функции измерительной схемы с различным характером сопротивления, соединяющего операционные усилители измерительной схемы, позволил выбрать характер данного сопротивления. В результате чего характер всех сопротивлений в составе измерительной схемы приобрел окончательный вид. *Выводы.* Использование измерительной схемы с рассматриваемой структурой построения в составе измерительного устройства, предназначенного для оценки значения параметров МДП-структур, особенно в отработке технологии процесса их изготовления, позволит увеличить процент выхода годных различных компонентов, выпускаемых на их основе.

Ключевые слова: измерительная схема, МДП-структура, операционный усилитель, обратная связь по постоянному току, выходное напряжение, передаточная функция, режим заданного тока, режим заданного напряжения, вариант построения ИС, скачок напряжения, характер пропорциональности

Для цитирования: Чайковский В. М. Измерительная схема для преобразования параметров МДП-структуры // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 68–73. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-8

MEASURING CIRCUIT FOR CONVERSION PARAMETERS OF THE MIS-STRUCTURE

V.M. Chaykovskiy

Penza State University, Penza, Russia
radiolokaci@yandex.ru

Abstract. *Background.* The information value of the process of measuring the parameters of the MIS-structure is determined to the maximum extent by the configuration of the measuring circuit, which converts the parameters of the MIS-structure as a passive object into active values. *Materials and methods.* It is proposed to build a measuring circuit of two series-connected operational amplifiers covered by common AC feedback. The justification for the configuration of the measuring circuit is based both on the use of the invariant transformation method and the foundations of the theory of a DC amplifier, using the Laplace transform. *Results.* Carried out comparative analysis of the transfer function of the measuring circuit with a different character of the resistance connecting the operational amplifiers of the measuring circuit

made it possible to choose the character of this resistance. As a result, the nature of all resistances in the measuring circuit acquired its final form. *Conclusions.* Use measuring circuit with the structure under consideration as part of a measuring device designed to assess the value of MIS-structures parameters, especially in debugging the technology of their manufacturing process, will increase the percentage of yield of various components produced on their basis.

Keywords: measuring circuit, MIS-structure, operational amplifier, DC feedback, output voltage, transfer function, preset current mode, preset voltage mode, IE construction option, voltage jump, proportionality character

For citation: Chaykovskiy V.M. Measuring circuit for conversion parameters of the MIS-structure. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(2):68–73. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-8

Введение и постановка задачи

Интенсивное развитие электроники стало возможно за счет использования микроселектронных компонентов широкой номенклатуры, хорошо представленной в работе [1], разработанных с использованием МДП-структуры (рис. 1), особенно для разработки аппаратуры двойного назначения, включая как военное, так и космическое [2]. Свойства как самих компонентов, так и различных устройств, основанных на их использовании, будут в огромной степени определяться электрофизическими свойствами МДП-структур, служащими основой для изготовления данных компонентов. Поэтому контроль параметров МДП-структур, в ходе процесса изготовления последних, бесспорно, весьма актуален.



Рис. 1. Состав МДП-структуры

МДП-структура представляет собой пассивный объект, который при дальнейшем рассмотрении будем характеризовать просто полным сопротивлением вида $Z_{\text{МДП}}(p)$. Методика оценки значения параметров пассивного объекта, который в силу своей пассивности никаким образом себя не проявляет, была предложена и хорошо развита рядом научных школ, возглавляемых профессорами А. И. Мартяшиным, Э. К. Шаховым, В. М. Шляндиным [3]. Упомянутая методика заключается в инвариантном преобразовании, представляющем воздействие на объект, входящий в состав измерительной схемы (ИС) на основе операционного усилителя (ОУ), активной величиной в виде напряжения U_0 , которое может быть как гармоническим, так и импульсным в виде скачка напряжения. С последующим выделением из выходного напряжения ИС, являющегося реакцией исследуемой пассивной величины на внешнее воздействие, при этом амплитуды составляющих выходного напряжения ОУ, являющегося основным элементом ИС, будут пропорциональны значению того или иного параметра пассивного объекта. Опыт построения аналогичных преобразователей параметров неэлектрических величин показывает [3], что преобразование параметров МДП-структуры может быть осуществлено ИС на базе ОУ и реализовано по схеме одного из вариантов, приведенных на рис. 2, где показан вариант преобразования в режиме заданного напряжения и режиме заданного тока соответственно.

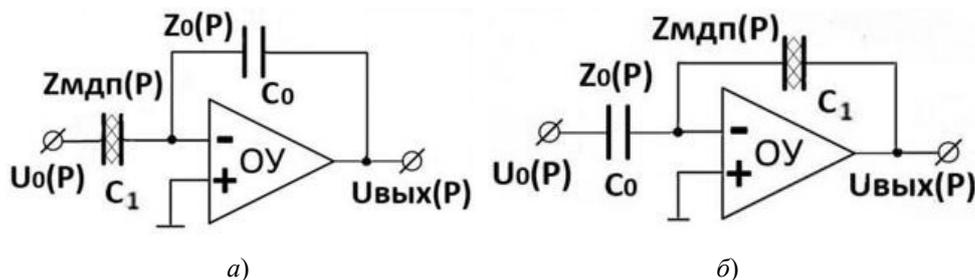


Рис. 2. Возможные варианты построения ИС

Будем считать в дальнейшем, что сопротивление МДП-структуры $Z_{\text{МДП}}(p)$ носит чисто емкостной характер и характеризуется только полной емкостью, тогда $Z_{\text{МДП}}(p) = 1/pC_1$.

Метод решения

При выборе какого-либо из возможных вариантов схемы построения ИС необходимо учитывать два весьма важных момента, первое – это то, что кроме напряжения U_0 , являющегося входным для ИС, и которое, согласно работам [4, 5], должно иметь «малую» амплитуду порядка 20 мВ, и одновременно с данным напряжением на МДП-структуру должно действовать напряжение постоянного тока с медленно изменяющимся, иногда в достаточно широком диапазоне, значением амплитуды. Подача данного напряжения требует создания цепей развязки в виде специальных схемотехнических решений, для варианта ИС вида рис. 2,а данная задача решается достаточно легко, а вот для ИС вида рис. 2,б подключение дополнительных элементов в цепь обратной связи ОУ приводит к потере его устойчивости особенно при вхождении МДП-структуры в состояние обогащения, в котором сопротивление структуры характеризуется только одним слоем диэлектрика. Второй не менее важный момент заключается в том, что характер зависимости значений амплитуд составляющих выходных напряжений ИС от параметров МДП-структуры будут иметь различную пропорциональность. Так, для ИС рис. 2,а он будет прямо пропорциональный, а для ИС рис. 2,б – обратно, соответственно выходные напряжения данных ИС будут иметь во временной области следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(t)_{2,а} = -U_0 \frac{C_1}{C_0}; \quad (1)$$

$$U_{\text{вых}}(t)_{2,б} = -U_0 \frac{C_0}{C_1}. \quad (2)$$

Следует помнить, что данный характер пропорциональности в значительной степени будет оказывать влияние на удобство восприятия и интерпретации получаемых результатов преобразования. Из сказанного очевидно, что наличие у ИС рис. 2,а указанных достоинств делает ее наиболее предпочтительной с точки зрения практического использования по сравнению с ИС рис. 2,б, поэтому будем считать выражение (1) идеальным.

Из описания работы усилителя постоянного тока, каким является ОУ в ИС известно [6–9], что для нахождения последнего в линейном режиме и с целью исключения вхождения его в режим насыщения, ОУ должен иметь стабильную обратную связь по постоянному току. Соблюдение данного требования для выбранной ИС рис. 2,а становится особенно актуально, так как в обратной связи ОУ данной ИС находится конденсатор емкостью C_0 , что приводит к накоплению заряда на последней, а это будет вводить ОУ в состояние насыщения. Для исключения данного явления необходимо предусмотреть в данной ИС цепь разряда емкости C_0 , роль которой и должна выполнять цепь обратной связи по постоянному току. Данную цепь можно реализовать путем включения параллельно емкости C_0 резистора либо T -образного RC -фильтра, значения параметров элементов которого будут привязаны к значению емкости C_0 , а это вызывает усложнение схемы практической реализации такого подхода, так как при смене диапазона преобразования, происходящего путем смены значения емкости C_0 , придется менять с помощью средств коммутации значения параметров RC -фильтра. Такие значительные изменения структуры построения ИС приводят в обоих случаях к возникновению значительной методической погрешности преобразования параметров МДП-структуры.

Поэтому построение ИС предлагается организовать в виде двух последовательно соединенных ОУ рис. 3, где образцовый элемент с сопротивлением $Z_0(p)$ помещается в цепь обратной связи, общую для этих двух ОУ, каждый из которых имеет устойчивую, стабильную обратную связь по постоянному току рис. 3, причем обратная связь каждого из ОУ не оказывает влияния на характер протекающего процесса преобразования.

Включение ОУ1 представляет собой повторитель напряжения со 100 %-обратной связью по постоянному току, а включение ОУ2 представляет масштабирующий каскад, имеющий тоже стабильную обратную связь по постоянному току, причем характер сопротивления в его входной цепи $z_1(p)$ может носить как емкостной, так и активный характер.

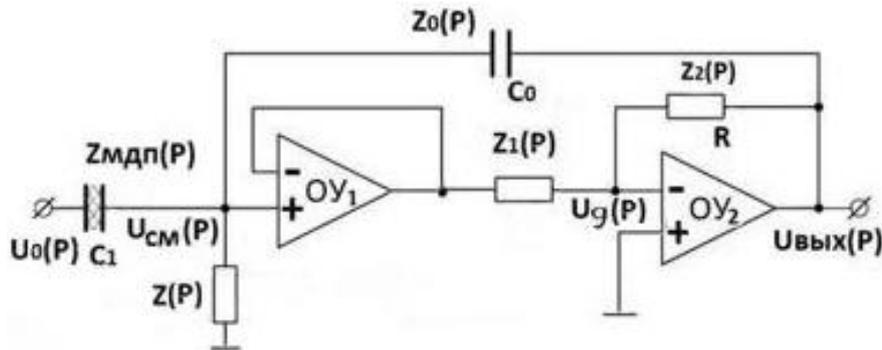


Рис. 3. ИС на базе двух ОУ

Для окончательного выбора варианта ИС, состоящей из последовательно включенных двух каскадов на ОУ, соединенных между собой либо через резистор, либо через емкость, необходимо выяснить, насколько будет отличаться выходное напряжение ИС рис. 3 для каждого из этих двух перечисленных характеров сопротивления $z_1(p)$. Причем сравнение следует провести с выражением (1) выходного напряжения ИС рис. 2,а, считающимся идеальным.

Сравнительный анализ

Необходимо определить, в каком случае ИС рис. 3 будет обладать наименьшей методической погрешностью при преобразовании параметров МДП-структуры. Для чего требуется получить в общем виде выражение выходного напряжения ИС рис. 3, а для этого необходимо решить ниже следующую систему уравнений, составленных согласно протекаемых в ИС процессов и определяемых выполнением следующих условий [6–9]:

- ток в цепи обратной связи ОУ равен току в его входной цепи;
- выходное напряжение ОУ равно произведению его входного дифференциального напряжения $U_g(p)$ на коэффициент усиления ОУ.

Данная система уравнений составлена в соответствии с законом Кирхгофа и с соблюдением условий, приведенных строкой выше:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_0(p) - U_{CM}(p)}{Z_{МДП}(p)} = \frac{U_{CM}(p) - U_{ВЫХ}(p)}{Z_0(p)} + \frac{U_{CM}(p)}{Z(p)}, \\ \frac{U_{CM}(p) - U_g(p)}{Z_1(p)} = \frac{U_g(p) - U_{ВЫХ}(p)}{Z_2(p)}, \\ U_{ВЫХ}(p) = -U_g(p) \cdot K_2, \end{array} \right. \quad (3)$$

где K_2 – коэффициент усиления ОУ₂, $K_2 \gg 1$.

Решение системы уравнений (3) позволяет получить выражение для выходного напряжения ИС в операторной форме рис. 3 в следующем виде:

$$U_{ВЫХ ИС}(p) = -U_0(p) \frac{Z_0(p)}{Z_{МДП}(p)} \cdot \left(1 + \frac{Z_1(p)}{Z_2(p)} \cdot \left[1 + \frac{Z_0(p)}{Z_{МДП}(p)} \right] \right)^{-1}. \quad (4)$$

Далее необходимо провести анализ последнего выражения и убедиться в степени его отличия от идеального выражения (1) для двух случаев, когда характер сопротивления $z_1(p)$, как указывалось выше, может быть либо активным, либо емкостным.

Анализ (4) показывает, что основным условием для приближения его к выражению (1) является устремление к нулевому значению слагаемого у единицы в знаменателе дроби выражения (4). Если характер $z_1(p)$ будет активным, то для достижения выше упомянутого условия очевидно, что необходимо значительно уменьшать значение сопротивления $z_1(p)$ и одновременно с этим увеличивать значение сопротивления $z_2(p)$ в цепи обратной связи ОУ₂, но в результате всего этого последний потеряет устойчивость. На основании чего можно сделать вывод, что данный вариант реализации ИС практической ценности не имеет.

В случае, если $z_1(p)$ носит емкостной характер, то для приближения преобразования ИС к идеальному необходимо значительно увеличивать как значение емкости у сопротивления $z_1(p)$, так и значение сопротивления $z_2(p)$ в цепи обратной связи ОУ2. Данное действие приведет к двоякому положительному эффекту, во-первых, ОУ2 при этом будет выполнять функцию дифференциатора с большой постоянной времени, имея при этом устойчивую работу. Во-вторых, наличие большой постоянной времени расширит полосу пропускания частот ОУ2 в область нижних частот, что в случае проведения ИС преобразования на импульсном сигнале, когда выходное напряжение последней тоже будет имеет импульсный характер, исключается эффект «скола» вершины импульса выходного напряжения.

В результате проведенного сравнительного анализа следует признать, что ИС, структура которой приведена на рис. 3, обладает достаточной привлекательностью с точки зрения практического использования, в связи с чем она была использована и испытана при построении макетного образца измерительного комплекса для исследования МДП-структуры, а именно при обработке методики оценки гистерезисных свойств МДП-структуры [10].

Заключение

Построение измерительной схемы в виде описанного (см. рис. 3) последовательного соединения двух ОУ, первый из которых включен в режиме повторителя напряжения, а второй – в режиме дифференциатора с большой постоянной времени, имеет не только неоспоримое преимущество в плане осуществления преобразования близкого к идеальному, но и обладает еще хорошей перспективой его практического использования при организации процесса преобразования параметров различных, широкого круга пассивных объектов типа различных датчиков, имеющих емкостной характер. Данное хорошо согласуется с ранее приведенным утверждением о том, что для удобства интерпретации получаемого в ходе преобразования результата, характер сопротивления образцового сопротивления в составе измерительной схемы должен быть аналогичен характеру преобразуемого. В ходе макетирования и проведения настроечных работ путем подбора было выяснено, что описанный вариант построения ИС показывает весьма хороший результат при использовании в качестве его сопротивлений $z_1(p)$ и $z_2(p)$ соответственно конденсатора типа К73-17 емкостью 2,2 мкФ и резистора типа С3-14 номиналом 6,3 МОм.

Список литературы

1. Свистунова Т. В. Основы микроэлектроники : учеб. пособие. Воронеж : ВГТУ, 2017. 149 с.
2. Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника : в 2 кн. М. : Техносфера, 2015. Кн. 2. 488 с.
3. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. М. : Энергия, 1976. 392 с.
4. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / пер. с англ. под ред. Р. А. Суриса : в 2 кн. М. : Мир, 1984. Кн. 1. 456 с.
5. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
6. Лукьянов Г. Н., Белякова И. И., Балобей Ф. П. Операционные усилители : учеб. пособие. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. 78 с.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. 12-е изд. М. : ДМК Пресс, 2008. Т. 1. 832 с.
8. Картер Б. Операционные усилители для всех / пер. с англ. А. Н. Рабодзея. 2-е изд. М. : ДМК Пресс, 2023. 529 с.
9. Осадченко В. Х., Волкова Я. Ю. Операционные усилители : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. 156 с.
10. Ташлинцев Д. А., Чайковский В. М. Измерение зарядовой нестабильности МДП-структуры // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 3. С. 17–24.

References

1. Svistunova T.V. *Osnovy mikroelektroniki: ucheb. posobie = Fundamentals of microelectronics : a textbook*. Voronezh: VGTU, 2017:149. (In Russ.)
2. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. *Kosmicheskaya elektronika: v 2 kn. = Space electronics : in 2 books*. Moscow: Tekhnosfera, 2015;Bk.2:488. (In Russ.)
3. Mart'yashin A.I., Shakhov E.K., Shlyandin V.M. *Preobrazovateli elektricheskikh parametrov dlya sistem kontrolya i izmereniya = Converters of electrical parameters for monitoring and measurement systems*. Moscow: Energiya, 1976:392. (In Russ.)

4. Zi S.M. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov: v 2 kn. = Physics of semiconductor devices : in 2 books.* Moscow: Mir, 1984;Bk.1:456. (In Russ.)
5. Gurtov V.A. *Tverdotel'naya elektronika: ucheb. posobie = Solid-state electronics : a textbook.* Moscow, 2005:492. (In Russ.)
6. Luk'yanov G.N., Belyakova I.I., Balobey F.P. *Operatsionnye usiliteli: ucheb. posobie = Operational amplifiers : a textbook.* Saint Petersburg: NIU ITMO, 2012:78. (In Russ.)
7. Tittse U., Shenk K. *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika: per. s nem. 12-e izd. = Semiconductor circuit engineering : translated from German. 12th ed.* Moscow: DMK Press, 2008;1:832. (In Russ.)
8. Karter B. *Operatsionnye usiliteli dlya vseh / per. s angl. A.N. Rabodzeya. 2-e izd. = Operational amplifiers for everyone / translated from English by A. N. Rabodzey. 2nd ed.* Moscow: DMK Press, 2023:529. (In Russ.)
9. Osadchenko V.Kh., Volkova Ya.Yu. *Operatsionnye usiliteli: ucheb. posobie = Operational amplifiers : a textbook.* Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2020:156. (In Russ.)
10. Tashlintsev D.A., Chaykovskiy V.M. Measurement of the charge instability of the MDP structure. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2024;(3): 17–24. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Михайлович Чайковский

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: radiolokaci@yandex.ru

Victor M. Chaykovskiy

Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of radio engineering and radio electronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 26.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.03.2025

Принята к публикации / Accepted 02.04.2025