

УДК 681.5.08

## КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ДАТЧИК С ДРЕВОВИДНОЙ СТРУКТУРОЙ

© Е. С. Денисов, И. Д. Шафигуллин, Ю. К. Евдокимов

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева-КАИ,  
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10  
E-mail: ilnaz\_shafigullin@mail.ru*

Предложен и экспериментально исследован квазираспределённый резистивный датчик с древовидной структурой, который позволяет измерять пространственное распределение физических величин при коммутации измерительных цепей только к внешним терминалам. Показано, что применение древовидной структуры обеспечивает высокую точность при малых вычислительных затратах.

*Ключевые слова:* квазираспределённый датчик, квазираспределённый резистивный датчик, древовидная структура, измерение физических полей.

DOI: 10.15372/AUT20210213

**Введение.** Многие процессы в технических и технологических системах описываются пространственно-временными полями различной физической природы. Для решения задач контроля и управления такими системами требуются распределённые датчики и методы, позволяющие измерять соответствующие пространственно-временные поля.

Один из вариантов реализации таких измерительных средств — системы на основе совокупности традиционных точечных датчиков, которые распределяются по объекту и в процессе работы формируют набор локальных (точечных) оценок физической величины. Основным недостатком такого подхода является использование большого количества измерительных каналов с прецизионной вторичной аппаратурой и, как следствие, большого количества соединительных проводов.

Улучшить массогабаритные параметры и уменьшить количество соединительных проводов позволяют адресуемые полупроводниковые интегральные датчики. Особенности таких датчиков — встроенный измерительный канал и средства передачи результатов измерения по шинам данных. Недостатками этих датчиков являются ограничения, связанные с использованием полупроводниковых материалов в условиях высоких температур, давлений, агрессивных сред, а также их повышенные массогабаритные характеристики. Для измерения физических полей используются адресуемые волоконно-оптические датчики [1, 2]. Их активное применение ограничивается дороговизной и технической сложностью измерительного оборудования.

Другой подход к измерению пространственно-временных полей — применение непрерывных распределённых датчиков [3, 4], которые эквивалентны по информативности нескольким десяткам и сотням дискретных точечных датчиков. Распределённые датчики лишены недостатков многоточечных схем измерения, а именно: малого быстродействия, наличия большого количества проводов и измерительных каналов, — однако их использование требует реализации сложных алгоритмов обработки измерительной информации.

Промежуточное положение между многоточечными измерительными системами и непрерывными распределёнными датчиками занимают квазираспределённые датчики

(КРД), которые осуществляют измерение параметров физических полей в заданной совокупности точек объекта посредством дискретных чувствительных элементов (резистивных, ёмкостных, пьезоэлектрических, полупроводниковых и др.) без необходимости их подключения к отдельным каналам [4–5]. Благодаря устойчивости к внешним воздействиям, технологичности изготовления и экономичности широко используются квазираспределённые резистивные датчики (КРРД) [6–8], которые образуются посредством соединения резистивных чувствительных элементов в специализированные измерительные структуры. Широкое распространение в настоящее время получила матричная структура [6, 7, 9] с системами коммутации чувствительных элементов. Для обеспечения коммутируемого электрического соединения со всеми элементами такие структуры реализуются многослойными. Следует учитывать возможность возникновения перекрёстных помех в случае отсутствия подключения одного из выводов к цепям питания или земле [6]. К другому виду КРРД можно отнести сеточную структуру [8], отдельные резистивные чувствительные элементы которой образуют двумерную сеть с прямоугольной ячейкой. В таком КРРД параметры чувствительных элементов находятся путём решения системы уравнений, составленной на основе результатов измерений токов и напряжений на внешних выводах датчика. Недостатком данной структуры является сложность коммутации измерительного оборудования и вычислительных процедур. Кроме того, наблюдается быстрый рост погрешности измерений с ростом количества чувствительных элементов.

Несмотря на большое число работ, связанных с созданием КРД, требуются дополнительные исследования для увеличения их точности и уменьшения затрат при изготовлении и использовании. Для решения этих задач предлагается оригинальная древовидная структура для КРРД с повышенными эксплуатационными характеристиками.

#### **Древовидная структура для квазираспределённых резистивных датчиков.**

Анализ КРРД с сеточной структурой показывает, что основной причиной сложности вычислений и низкой точности при большом количестве элементов является тот факт, что зондирующий и измерительный токи протекают через одни и те же элементы. Это приводит к необходимости решения систем уравнений большой размерности.

Рассмотрим КРРД на основе предложенной оригинальной древовидной структуры (рис. 1), которая позволяет обеспечить разные пути протекания зондирующего и измерительного токов. Одномерная древовидная структура представляет собой соединение трёх чувствительных элементов в каждом узле. Пример соответствующего КРРД из 15 чувствительных резистивных элементов показан на рис. 1. В общем случае при определении величин сопротивлений чувствительных элементов требуется решить систему уравнений

$$\mathbf{G}\mathbf{V} = \mathbf{I}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{I}$  — вектор значений токов;  $\mathbf{V}$  — вектор значений узловых потенциалов;  $\mathbf{G}$  — матрица проводимостей, полученная из неизвестных сопротивлений  $R$  чувствительных элементов. Следует отметить, что при фиксированном подключении источника тока система (1) не может быть решена относительно неизвестных сопротивлений, поскольку их количество превышает число уравнений. Система уравнений (1) может быть расширена требуемым количеством уравнений при измерении распределения токов, вызванных, например, изменением точек подключения источника тока. Однако в общем случае это приводит к необходимости решения системы уравнений более высокой размерности.

Предложенная организация древовидной структуры даёт возможность упростить расчёт системы уравнений (1), поскольку топологическое разнесение путей протекания зондирующего и измерительного токов позволяет оценивать сопротивления отдельных чувствительных элементов на основе закона Ома. Рассмотрим предложенный метод на

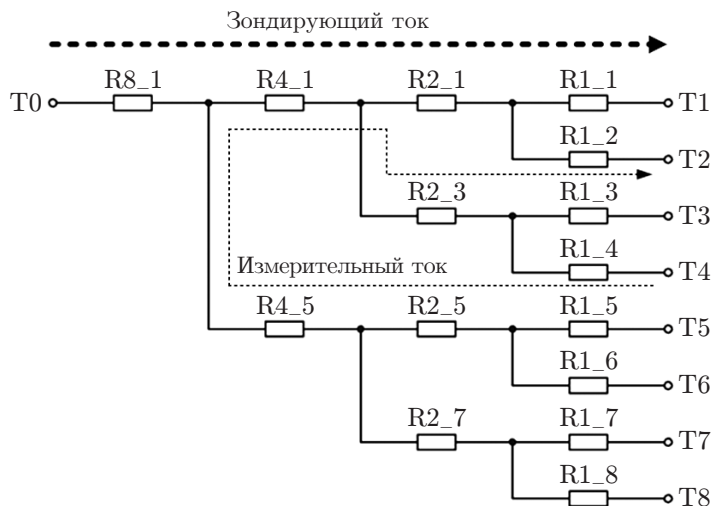


Рис. 1. Структура квазираспределённого резистивного датчика, состоящего из 15 чувствительных элементов с распределением токов при определении величины сопротивления  $R_{4.1}$

примере измерения сопротивления чувствительного элемента  $R_{4.1}$  (см. рис. 1). Каждый вывод этого элемента, как и остальных элементов схемы, имеет минимум два независимых пути подключения к внешним терминалам, которые могут использоваться для подключения источника тока и измерительного оборудования. Например, источник тока, подключённый к терминалам  $T_0$  и  $T_1$ , вызывает протекание зондирующего тока через элементы  $R_{8.1} - R_{4.1} - R_{2.1} - R_{1.1}$ , а входной ток измерителя напряжения, соединённого с терминалами  $T_3$  и  $T_5$ , проходит через элементы  $R_{1.5} - R_{2.5} - R_{4.5} - R_{4.1} - R_{2.3} - R_{1.3}$ . Как видим, зондирующий и измерительный токи одновременно протекают только через исследуемый чувствительный резистивный элемент  $R_{4.1}$  и можно записать следующее соотношение:

$$V_{T_3T_5} = I_{\text{изм}}(R_{1.5} + R_{2.5} + R_{4.5} + R_{4.1} + R_{2.3} + R_{1.3}) + I_{\text{зонд}}R_{4.1}, \quad (2)$$

где  $V_{T_3T_5}$  — разность потенциалов между выводами  $T_3$  и  $T_5$ ;  $I_{\text{изм}}$  и  $I_{\text{зонд}}$  — измерительный и зондирующий токи соответственно.

Учитывая большое входное сопротивление современных измерителей напряжения и малую величину измерительного тока ( $I_{\text{изм}} \ll I_{\text{зонд}}$ ), первым слагаемым в (2) можно пренебречь и найти неизвестное сопротивление  $R_{4.1}$  как

$$R_{4.1} = V_{T_3T_5} / I_{\text{зонд}}. \quad (3)$$

Аналогичный подход может использоваться для нахождения сопротивлений остальных элементов схемы. Таким образом, предложенная топологическая структура позволяет свести решение системы уравнений (1) к операциям только внешней коммутации измерительного оборудования и нахождения соотношения между показаниями измерителя напряжения и величины зондирующего тока. Следует отметить, что принцип разделения путей протекания для зондирующего и измерительного токов схож с принципом, положенным в основу четырёхпроводной схемы измерения.

В общем случае зондирующий ток может быть переменным. При этом измерительные процедуры будут проводиться на переменном токе, что приведёт к устранению ряда мешающих факторов, таких как влияние термопарных эффектов в зоне контакта различных

металлов, а также фликкер-шумов. В этом случае величины в формулах (1)–(3) представляются в комплексной форме.

**Экспериментальное исследование.** Экспериментальная проверка предложенной структуры КРРД проводилась на основе макета из 15 резисторов (см. рис. 1) с номинальным сопротивлением 1 кОм и разбросом параметров 1 %. Измерения производились с помощью потенциостата-гальваностата Р-2Х (Electrochemical Instruments, Россия). Действительные значения сопротивлений находились путём усреднения 2000 результатов их непосредственной оценки. Величины сопротивлений чувствительных элементов КРРД с древовидной структурой определялись согласно вышепредложенной методике. Оценка вносимой погрешности предложенной структуры КРРД показала, что относительная погрешность определения величин сопротивлений в древовидной структуре не превышает 0,05 %. Данная погрешность учитывает инструментальную и методическую погрешности, а её малое значение подтверждает эффективность предложенного КРРД и соответствующей методики измерения.

**Заключение.** Предложен квазираспределённый резистивный датчик, к преимуществам которого можно отнести высокую точность измерений при невысокой вычислительной нагрузке, использование стандартных измерительных средств и несложной схемы коммутации. Указанные преимущества обусловлены оригинальной древовидной топологической структурой, обеспечивающей разделение путей протекания зондирующего и измерительного токов. Представлена методика измерений сопротивлений чувствительных элементов КРРД на основе измерений потенциалов и токов на внешних терминалах при различных подключениях источника зондирующего тока. Экспериментально показано, что предложенный датчик обеспечивает малый уровень методической погрешности и общая погрешность измерений в основном обусловлена преобладающим вкладом инструментальной составляющей погрешности.

Предложенный КРРД имеет широкий спектр возможных применений, связанных с задачами измерения, управления, контроля и диагностики пространственно-распределённых объектов различной природы.

**Финансирование.** Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-03-2020-051, тема № fzs-2020-0020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ding Z., Wang C., Liu K. et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review // *Sensors (Switzerland)*. 2018. **18**, Iss. 4. P. 1–31.
2. Морозов О. Г., Сахабутдинов А. Ж. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах // *Компьютерная оптика*. 2019. **43**, № 4. С. 535–543.
3. Evdokimov Yu. K., Martemianov S. Continuously distributed sensors for steady-state temperature profile measurements: Main principles and numerical algorithm // *Intern. Journ. Heat and Mass Transfer*. 2004. **47**, N 2. P. 329–340.
4. Евдокимов Ю. К., Мохаммед Х. С. А., Храмов Л. Д. Полупроводниковый одномерный распределённый датчик температурного поля: численный алгоритм измерения и его программная реализация // *Вестн. КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2018. **74**, № 4. С. 118–123.
5. Евдокимов Ю. К., Партс Я. А. Квазираспределённые пьезорезонансные датчики в промышленных системах измерения температуры // *Мир измерений*. 2010. № 3. С. 13–20.
6. Vidal-Verdú F., Oballe-Peinado Ó., Sánchez-Durán J. A. et al. Three realizations and comparison of hardware for piezoresistive tactile sensors // *Sensors*. 2011. **11**, N 3. P. 3249–3266.

7. **Shu L., Tao X., Feng D. D.** A new approach for readout of resistive sensor arrays for wearable electronic applications // IEEE Sensors Journal. 2015. **15**, N 1. P. 442–452.
8. **Denisov E., Adiutantov N., Evdokimov Y. K. et al.** Quasi-distributed resistive sensor for steady-state field measurements // Proc. of the Intern. Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Moscow, Russian Federation, 12–14 May, 2016. P. 1–5.
9. **Zhou B.** Resistive pressure force sensor matrix for wearable and ubiquitous computing: Master thesis. Technische Universität Kaiserslautern, 2013. 72 p.

*Поступила в редакцию 12.10.2020*

*После доработки 12.11.2020*

*Принята к публикации 23.11.2020*

---