

О.О. БАСОВ, С.П. БОГДАНОВ, А.А. ИВАНОВ  
**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ГРАФОВ ДЛЯ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТАКТИЛЬНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ**

---

*Басов О.О., Богданов С.П., Иванов А.А.* **Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров.**

**Аннотация.** Рассмотрен подход к проектированию оптимальной структуры многофункционального беспроводного средства измерения тактильных параметров с автономным питанием на основе поиска кратчайших путей на графе, весам которого поставлен в соответствие обобщенный показатель, учитывающий энергопотребление, стоимость и техническую совместимость функциональных узлов. Приведен пример повышения точности оценки измеряемых параметров функционального состояния человека при использовании комбинированных беспроводных средств измерений.

**Ключевые слова:** полимодальная инфокоммуникационная система, беспроводные средства контроля, энергетическая избыточность.

*Basov O.O., Bogdanov S.P., Ivanov A.A.* **Graph theory practice for tactile characteristics measuring means design.**

**Abstract.** Design approach to the optimal structure of multifunctional wireless tactile measuring means with self-contained power supply based on the search of the shortest paths in the graph, the balance of which is mapped to composite index that takes into account energy consumption, cost and technical compatibility of the functional units is considered. An example of increasing the accuracy of estimates of the measured parameters of objects with the combined wireless measuring tools is provided.

**Keywords:** polymodal infocommunication system, wireless control, energy duplication.

---

**1. Введение.** Новой парадигмой в области телекоммуникационных и информационных технологий являются полимодальные инфокоммуникационные системы (ПИКС) [1]. Отказ в последних от традиционных принципов разделения передаваемой информации на услуги в пользу ее полимодального представления позволяет обеспечить перцептивную сторону общения (познание друг друга партнерами по общению), а их дальнейшая интеллектуализация – приблизить инфокоммуникационное взаимодействие абонентов к традиционному межличностному общению.

Полимодальные системы выделяют, обрабатывают и представляют информацию от различных каналов коммуникации человека. И если в настоящее время средства ввода и обработки сигналов текстового, акустического и визуального каналов достаточно развиты, а анализу запахов (ольфакторный канал) препятствует развитие чувствительных элементов средств измерения, то реализация последних для тактильного канала коммуникации является вполне выполнимой задачей.

**2. Постановка задачи измерения тактильных параметров человека.** Для эффективной реализации идентификации в ПИКС, мониторинга активности, определения физиологического и психоэмоционального состояний и прогнозирования намерений абонентов ключевыми параметрами являются температура и влажность их рук, а также создаваемое ими давление на органы управления полимодальными интерфейсами и элементы рабочего места. Очевидно, что измерение указанных параметров должно осуществляться скрытно и ненавязчиво для человека, концентрируя его внимание на выполняемой задаче, а соответствующие средства измерения учитывать многообразие возможных манипуляций абонента с элементами рабочего места (в том числе с органами управления абонентским терминалом ПИКС) и их взаимоположений.

Благодаря развитию полупроводниковой и оптоэлектронной элементной базы, миниатюризации интегральных микросхем и появлению новых технологий передачи в указанных выше ограничениях рациональным является применение беспроводных средств измерений (БСИ), при этом малоисследованным направлением развития последних является увеличение времени их работы средств без замены источников автономного электропитания.

Таким образом, измерение тактильных параметров человека в ПИКС является актуальной научно-технической задачей, решение которой может быть получено на основе применения БСИ при условии снижения их энергетической избыточности без ухудшения основных технических характеристик. Под энергетической избыточностью следует понимать ту часть потребляемой электрической мощности, которая не идет на выполнение основных заданных функций, выполняемой средством измерения.

**3. Моделирование беспроводных средств измерений с пониженным энергопотреблением.** Учитывая монотонность измеряемых тактильных параметров, появляется возможность их периодического измерения. С учетом этого для снижения структурной избыточности предлагается использовать одни и те же однотипные структурные элементы совмещенного БСИ в функциональных схемах нескольких разнотипных преобразователей, осуществляя их последовательную коммутацию.

Обобщенную структурную схему средства можно представить с помощью графа (рис. 1), у которого вершины соответствуют множеству структурных элементов средства, а ребра – связям между ними с учетом значений коэффициентов технической совместимости, определяющих соответствие двух сопрягаемых электронных

элементов ( $j$ -го и  $(j-1)$ -го блоков) по ряду важных характеристик (напряжению питания, точности, чувствительности, разрядности), сложности монтажа и т. д., которые находятся экспертным путем в диапазоне  $T_{ij} \in (0; 1]$ . Они могут быть определены на основе метода непосредственных экспертных оценок и присвоены весам ветвей (узлов).

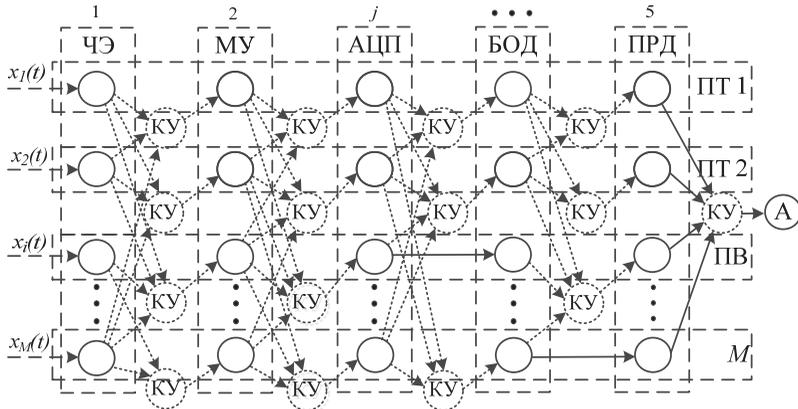


Рис. 1. Граф типовой структуры комбинированного (совмещенного) БСИ: ЧЭ – чувствительный элемент; МУ – масштабирующий усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; КУ – коммутационный узел; БОД – блок обработки данных; ПРД – передатчик; А – антенна; ПТ – преобразователь температуры; ПВ – преобразователь влажности;  $M$  – преобразователь  $M$ -го параметра

Наряду с коэффициентом технической совместимости  $T_{ij}$  при оптимизации структуры средства необходимо учитывать: энергопотребление  $E_{ij}$  отдельных электронных элементов и их стоимость  $S_{ij}$ .

Обобщенный показатель, характеризующий вес ветви (узла) графа может быть рассчитан следующим образом:

$$k_{ij} = \frac{E_{ij}^{\text{норм}} \cdot S_{ij}^{\text{норм}}}{T_{ij}}, \quad (1)$$

где  $j$  – номер блоков в структуре средства ( $j=1...5$ );  $i$  – номер структурного элемента в  $j$ -м блоке (группе элементов) ( $i=1...M$ );

$M$  – максимальное число структурных элементов одного типа блоков (группы элементов);  $E_{ij}^{\text{норм}}$ ,  $S_{ij}^{\text{норм}}$  – нормированные значения энергопотребления и стоимости  $i$ -го элемента  $j$ -го блока соответственно;  $k_{ij}$  – вес ребра к  $i$ -му элементу  $j$ -го блока.

**4. Синтез структур средств измерения тактильных параметров.** Минимизация обобщенного показателя (1):

$$l_{ij} \leftarrow \min(k_{ij} + l_{i(j-1)}), \quad (2)$$

где  $l_{ij}$  – сумма весов обобщенных показателей на маршруте от последнего узла ( $A$ ) ко всем первым, позволяет на основе алгоритма Дейкстры оптимизировать структуру БСИ с учетом требований по энергопотреблению, стоимости и коэффициента технической совместимости. При необходимости функциональная (структурная) схема средства измерения может быть представлена с большей степенью детализации (большим числом узлов), техническая совместимость формализована в виде отдельных параметров, а обобщенный показатель (1) расширен другими техническими характеристиками элементов. Использование такого технического решения позволяет унифицировать процесс разработки БСИ различного функционального назначения и сократить экономические затраты на их производство.

Для оптимизации структуры БСИ проведена модификация алгоритма Дейкстры (рис. 2) [2]. Исходными данными для его работы являются: матрица весов вершин  $K = \{k_{ij}\}$ , где  $k_{ij}$  – значения обобщенного показателя (1); и  $Y = \{y_{ijz}\}$  – матрица смежности, где  $y_{ijz}$  – принимает значения 0 (связь отсутствует) или 1 (связь есть) между вершинами шагов  $j$  и  $(j-1)$ ,  $i$  и  $z$  порядковые номера узлов на шагах.

К основным этапам функционирования алгоритма оптимизации относятся:

I – получение матрицы маршрутов  $Tr = \{Tr_{ij}\}$ , обеспечивающих минимальные значения весов пути для всех вершин графа;

II – восстановление массива оптимальных маршрутов  $Op = \{Op_{ij}\}$ ;

III – удаление узлов графа, соответствующих КУ с одним входом;

IV – формирование матрицы коммутаций  $Mk = \{Mk_{ij}\}$ , определяющей режимы работы коммутационных узлов.

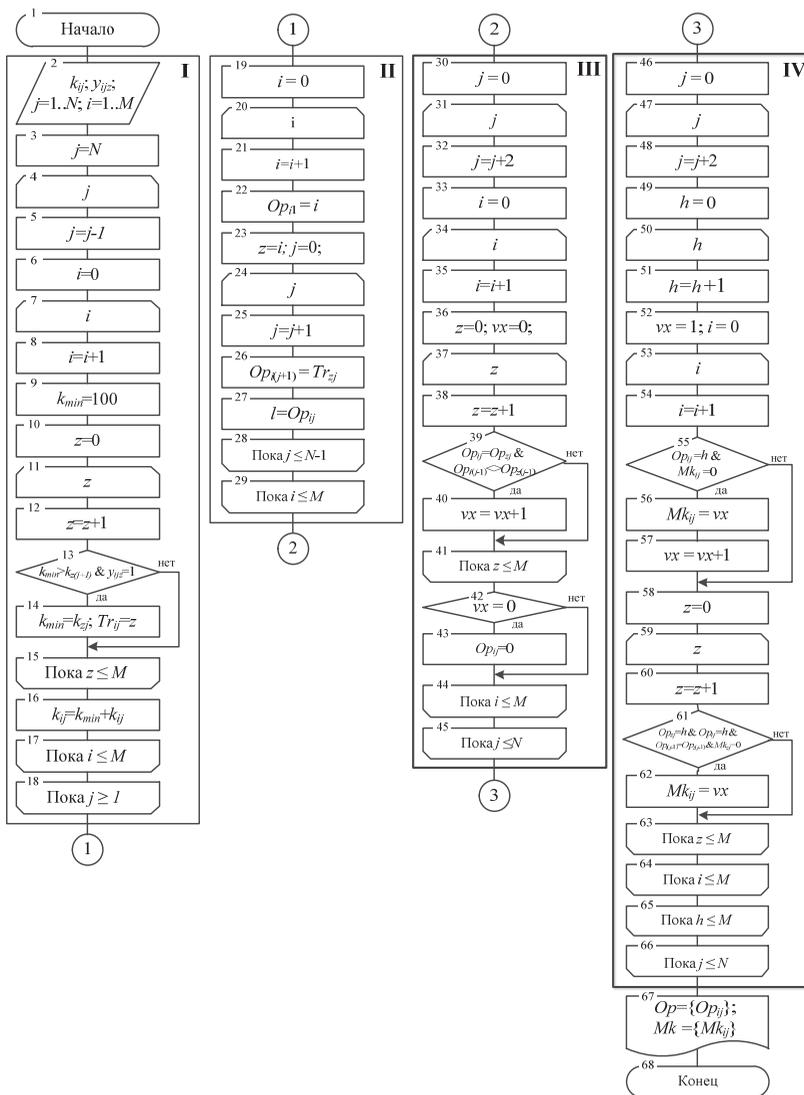


Рис. 2. Алгоритм оптимизации структуры комбинированного БСИ

Первые два этапа соответствуют выполнению классического алгоритма поиска кратчайших путей (алгоритм Дейкстры), а реализация третьего позволяет получить оптимальные маршруты, не содержащие КУ с одним входом, на четвертом – формируется матрица коммутаций, в соответствии с которой определяется таблица динамической адресации КУ.

Практическое использование разработанного алгоритма [3] позволяет снизить структурную избыточность совмещенных и комбинированных БСИ с автономным электропитанием.

### **5. Повышение точности измерения тактильных параметров.**

Отдельного анализа требует оценка точности измерений параметров полученных комбинированным БСИ, которую можно оценить на примере рассмотрения характеристик температурного датчика.

Пусть  $T$  – действительное значение температуры, которую следует оценить, используя множество измерений  $x_i$  ( $i=1..n$ ), поступающих от разных чувствительных элементов. Тогда измеренное значение можно представить в виде:

$$x_i = T + \xi_i, \quad (3)$$

где  $\xi_i$  – различного рода систематические и случайные погрешности, сопутствующие измерениям.

Основными источниками погрешностей датчиков температуры являются [4]:

- нелинейность функции преобразования;
- погрешности квантования выходного сигнала, если в устройстве осуществляется его аналого-цифровое преобразование;
- технологические отклонения конструктивных параметров чувствительных элементов от их номинальных значений;
- неточность калибровки датчиков температуры;
- воздействие факторов окружающей среды.

Оценку  $\hat{T}$  измеряемой температуры  $t$  по имеющемуся множеству  $x_i$  можно описать в виде их линейной комбинации:

$$\hat{T} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = \sum_{i=1}^n a_ix_i, \quad (4)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, характеризующие вес каждого измерения в формировании оценки. Значение коэффициентов  $a_i$  выбираются с учетом стандартных требований к оценке – несмещенности, состоятельности и эффективности.

Несмещенность оценки означает отсутствие систематических погрешностей в измеренных данных, для этого ее математическое ожидание должно быть равно оцениваемому параметру.

Состоятельность заключается в том, что с ростом числа измерений дисперсия стремится к нулю. Для измеряемого параметра оценка эффективна, если имеет минимальную дисперсию. Учитывая это [5], значения коэффициентов:

$$a_i = \frac{1}{d_i} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}, \quad (5)$$

где  $d_i$  – дисперсия погрешности в соответствующем измерении, т. е. вес каждого измерения  $x_i$  в результирующей оценке  $\hat{T}$  тем больше, чем меньше дисперсия погрешности, то есть чем точнее измерение.

Дисперсия ошибки оценки  $d(\hat{T})$  может быть вычислена посредством следующего отношения:

$$\frac{1}{d(\hat{T})} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что результирующая дисперсия оценки температуры будет всегда меньше дисперсии погрешности в любом измерении. Это означает, что даже информация от неточного (грубого) датчика улучшит качество оценивания параметра. Докажем это утверждение на примере.

### 6. Пример повышения точности измерения температуры.

Допустим, что поступила информация от трех датчиков температуры: точного с дисперсией  $d_1 = 1$ , средней точности с  $d_2 = 10$  и грубого с  $d_3 = 100$ .

Вес каждого измерения в соответствии с выражением (5):

$$a_1 = \frac{1}{1+0,1+0,01} = \frac{1}{1,11}; \quad a_2 = \frac{1}{11,1}; \quad a_3 = \frac{1}{111}.$$

Тогда оценку температуры можно представить следующим образом:

$$\hat{T} = \frac{1}{1,11}x_1 + \frac{1}{11,1}x_2 + \frac{1}{111}x_3,$$

т.е. видно, что вклад грубого датчика мал.

Дисперсия ошибки оценки определяется через выражение, как  $\frac{1}{d(\hat{T})} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}$  или  $d(\hat{T}) = \frac{d_1 d_2 d_3}{d_2 d_3 + d_1 d_3 + d_1 d_2}$  и равна  $d(\hat{T}) = \frac{1000}{1000+100+10} \approx 0,9009$ .

Сравнивая дисперсии ошибок оценок одного точного датчика ( $d(\hat{r})_1 = 1$ ) и трех, разной точности ( $d(\hat{r}) = 0,9009$ ), можно сделать вывод, что точность оценки можно улучшить (в приведенном примере на 10%), если, учитывая информацию, поступающую от нескольких даже неточных датчиков.

Поскольку точность оценки (характеризуется дисперсией ошибки оценки) по данным от нескольких датчиков всегда выше точности от каждого из измерений, то для повышения точности оценки измеряемых параметров целесообразно использовать комбинированные БСИ.

**7. Заключение.** Приведенные в работе данные позволяют сделать следующие выводы:

1) структура БСИ тактильных параметров может быть представлена в виде графа, у которого вершины соответствуют множеству функциональных узлов, ребра – связям между ними, а весам вершин (ребер) поставлены в соответствие значения введенного обобщенного показателя;

2) синтез совмещенных и комбинированных БСИ может быть осуществлен на основе разработанного алгоритма поиска кратчайших путей, дополненного процедурами удаления незадействованных функциональных узлов и формирования сигналов управления применяемыми коммутационными узлами;

3) для повышения точности оценки измеряемых тактильных параметров целесообразно использовать комбинированные БСИ, синтезированные по разработанному алгоритму.

Таким образом, применение методов теории графов позволяет синтезировать структуры БСИ тактильных параметров человека по критерию минимума обобщенного показателя, учитывающего энергопотребление, стоимость, техническую совместимость элементной базы.

## Литература

1. *Басов О.О., Саитов И.А.* Основные каналы межличностной коммуникации и их проекция на инфокоммуникационные системы // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 7(30). С. 122–140.
2. *Кристофидес Н.* Теория графов. Алгоритмический подход / пер. с англ. // М.: Мир. 1978. 432 с.
3. *Басов О.О., Богданов С.П., Гуляйкин Д.А.* Программа оптимизации структуры цифрового устройства // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616099 от 26.06.2013.
4. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений / 2-е изд., перераб. и доп. // Л.: Энергоатомиздат. 1991. 304 с.
5. *Зенкевич С.Л., Назаров А.В.* Оценка параметра по информации от нескольких датчиков // Механика, автоматизация, управление. 2010. № 9. С. 71–73.

## References

1. Basov O.O., Saitov I.A. [The main channels of interpersonal communication and their projection on the infocommunication systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. no. 7(30). pp. 122–140. (In Russ.).
2. Christofides N. Graph theory. An algorithmic approach. New York, Academic Press, 1975. (Russ. ed.: Kristofides N. Teoriia grafov. Algoritmicheskii podkhod. Moscow, Mir, 1978. 432 p.).
3. Basov O.O., Bogdanov S.P., Guljajkin D.A. *Programma optimizacii struktury cifrovogo ustrojstva* [Program of optimization of structure of digital devices]. Patent RF, no. 2013616099, 26.06.2013. (In Russ.).
4. Novickij P.V., Zograf I.A. *Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij. 2-e izd., pererab. i dop* [Estimation of errors of measurement results. 2nd ed., rev. and add.]. L.: Jenergoatomizdat, 1991. p. 304. (In Russ.).
5. Zenkevich S.L., Nazarov A.V. [Parameter estimate on information from multiple sensors]. *Mehanika, avtomatizacija, upravlenie – Mechanics, automation, control*. 2010. no. 9. pp. 71–73. (In Russ.).

**Басов Олег Олегович** — к-т техн. наук, докторант Академии ФСО России. Область научных интересов: обработка и кодирование речевых и иконических сигналов, проектирование полимодальных инфокоммуникационных систем. Число научных публикаций — 142. oobasov@mail.ru; Академия ФСО России, Приборостроительная, 35, г. Орел, 302034, РФ; р.т. +79192011897.

**Basov Oleg Olegovich** — Ph.D., doctoral, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: processing and coding of speech and iconic signals, polymodal infocommunicational systems design. The number of scientific publications — 142. oobasov@mail.ru; Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation, Pribrorostroitelnaya Street, 35, Orel, 302034, Russia, office phone +79192011897.

**Богданов Сергей Петрович** — к-т техн. наук., преподаватель Академии ФСО России. Область научных интересов: анализ и синтез беспроводных радиотехнический устройств. Число научных публикаций — 40. spbogdanov@mail.ru; Академия ФСО России, Приборостроительная, 35, г. Орел, 302034, РФ; р.т. +79103027620.

**Bogdanov Sergey Petrovich** — Ph.D., teacher, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: analysis and synthesis of wireless devices. The number of publications — 40. spbogdanov@mail.ru; Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation, Pribrorostroitelnaya Street, 35, Orel, 302034, Russia, office phone +79103027620.

**Иванов Александр Анатольевич** — инженер Академии ФСО России. Область научных интересов: анализ и синтез радиотехнический устройств и систем. Число научных публикаций — 3. Nms-orel-23@yandex.ru; Академия ФСО России, Приборостроительная, 35, г. Орел, 302034, РФ; р.т. +79051656250.

**Ivanov Aleksandr Anatol'evich** — engineer, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: analysis and synthesis of wireless devices. The number of publications — 3. Nms-orel-23@mail.ru; Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation, Pribrorostroitelnaya Street, 35, Orel, 302034, Russia, office phone +79051656250.

## РЕФЕРАТ

### *Басов О.О., Богданов С.П., Иванов А.А.* **Применение методов теории графов для проектирования средств измерения тактильных параметров.**

Для эффективной реализации идентификации в полимодальных инфокоммуникационных системах, мониторинга активности, определения психофизиологического состояния и прогнозирования намерений абонентов применяются автономные беспроводные средства измерения тактильных параметров. Одной из задач, на решение которой направлены усилия разработчиков беспроводных средств измерений, является увеличение времени их работы без замены источников автономного электропитания. Данная задача может быть решена путем снижения их энергетической избыточности без ухудшения основных технических характеристик.

Во втором разделе статьи предложен подход к формированию структурных схем совмещенных беспроводных средств измерений на основе теории графов. Определен обобщенный показатель, характеризующий вес ветви (узла) графа, учитывающий энергопотребление, стоимость и техническую совместимость отдельных элементов средства.

В третьем разделе авторами предложен модифицированный алгоритм Дейкстры, позволяющий синтезировать оптимальную структуру совмещенного беспроводного средства измерения. Особенностью данного алгоритма заключается в исключении коммутирующих узлов, содержащих один вход и формировании матрицы коммутации, в соответствии с которой определяется таблица динамической адресации задействованных коммутационных узлов. Практическое использование разработанного алгоритма позволяет снизить структурную избыточность совмещенных средств измерений с автономным электропитанием.

В четвертом разделе представлен анализ оценки точности измерений тактильных параметров, синтезированных по разработанному алгоритму комбинированных средств измерений. Математически доказано, что точность оценки (характеризуется дисперсией ошибки оценки) по данным от нескольких датчиков всегда выше точности от каждого из измерений, следовательно, для повышения точности оценки измеряемых тактильных параметров целесообразно использовать комбинированные беспроводные средства измерения.

Таким образом, авторами доказано, что применение методов теории графов позволяет синтезировать структуры совмещенных беспроводных средств измерений тактильных параметров человека по критерию минимума обобщенного показателя, учитывающего энергопотребление, стоимость, техническую совместимость элементной базы, а для комбинированных беспроводных средств измерений еще и повысить точность оценки измеряемых параметров.

## SUMMARY

### *Basov O.O., Bogdanov S.P., Ivanov A.A.* **Graph theory practice for tactile characteristics measuring means design.**

For effective implementation of identification in polymodal infocommunication systems, activity monitoring, psychophysiological state determination and subscribers' intentions predict stand-alone wireless measuring tactile parameters are used. One of the problems solved by the developers' efforts of wireless measuring instruments is the increasing the time of their work without replacement of independent power sources. This problem can be solved by reducing the redundancy of their energy without the main technical characteristics degradation.

In the second section of the paper an approach to the formation of structural combined wireless measuring instruments schemes based on graph theory is proposed. A generalized graph (node) edge' weight index which takes into account energy consumption, cost, and technical compatibility of individual means elements is defined.

In the third section, a modified Dejkstra algorithm, which allows to synthesize the optimal structure of the combined wireless measuring instrument is proposed. A feature of this algorithm is in exception the commuting nodes that contain one input and switching matrix formation, in accordance with the table which defines dynamic addressing, switching nodes is involved. Practical use of the developed algorithm can reduce the structural redundancy of measuring combined with an autonomous power supply.

In the fourth section the accuracy of measurements of tactile evaluation parameters analysis synthesized by means of the developed algorithm measurements combined is represented. Mathematically proved that the accuracy of estimation (is characterized by estimation error dispersion) according to data from several sensors is always higher than the accuracy of each measurement is therefore to improve the estimation accuracy of the measured parameters is appropriate to use tactile combined wireless measuring means.

Thus, the authors proved that the graph theory application allows one to synthesize combined wireless parameters of measuring tactile person's structures by a minimum overall index, which takes into account energy consumption, cost, technical compatibility element base, and for combined wireless measuring instruments also improve the accuracy of estimates of the measured parameters.