

Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств

А. Б. БУШУЕВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: bushuev@inbox.ru

Введено понятие передаточной матрицы блока информационно-энергетической схемы измерительного устройства в LT-базисе системы кинематических величин Бартини, ресурсами базиса являются пространство и время. Предложена численная оценка затрат ресурсов пространства-времени на преобразование известной входной величины блока в известную выходную величину. Даны рекомендации по синтезу физического принципа действия измерительного устройства, обладающего минимальной ресурсоемкостью, равной сумме затрат ресурсов блоков схемы.

Ключевые слова: базис Бартини, передаточная матрица блока, ресурсоемкость схемы, физический принцип действия.

The concept "transfer matrix" of the information and energy block diagram of measuring devices in LT-basis of R.O.Bartini cinematic values has been introduced. Space and time are resources in the Bartini LT basis. Numerical estimation of the costs of resources for transformation of the known input value to the known output value of the block is proposed. The resource capacity of the block diagram which is the sum of resource capacities of all blocks was obtained. The recommendations for the synthesis of the physical principle of the action of measuring device with the minimum resource capacity are given.

Key words: Bartini LT basis, transfer matrix of the block diagram, resource capacity, physical principle of the action.

Потоковые информационно-энергетические схемы (ИЭС) служат для моделирования физического принципа действия устройств [1] и представляют направленный граф, вершинами которого являются функциональные блоки, а рёбрами – физические величины на входах и выходах блоков. Физический принцип действия измерительных устройств отражает процесс преобразования потоков информации, энергии, вещества от измеряемой величины к выходной величине, например электрической, пригодной для дальнейшего использования. Потоковые схемы измерительных устройств применяются на этапе проектирования и, в частности, в изобретательской практике для изучения принципа работы и выбора аналогов и прототипа проектируемого устройства.

Более абстрактными моделями являются структурно-энергетические схемы [2]. В этих схемах используются всего два разных типа элементов: вещество и поле [3]. Под веществами понимаются любые элементы, устройства технической системы, её функциональные части, блоки. Поля отражают любое взаимодействие между веществами. Структурно-энергетическая схема также имеет вид направленного графа. Вершины графа – чередующиеся вещества и поля, рёбра показывают направление прохождения и преобразования энергии устройством. Высокий уровень абстракции структурной модели позволяет использовать некоторые общие правила работы с разными ИЭС. Например, в изобретательской практике на основе структурно-энергетической схемы строятся причинно-следственные цепочки, позволяющие выявлять противоречие между причиной и следствием, т. е. находить «узкое» место структуры, для которого и решается изобретательская задача.

В энергоинформационном методе цепей (ЭИМЦ), развиваемом школой М. Ф. Зарипова [4, 5], функциональными блоками структуры измерительно-преобразовательного устройства являются формализованные представления физико-технических эффектов. Для любого физического эффекта вершинами графа ЭИМЦ являются коэффициенты преобразования эффекта, а дугами – обобщённые величины (импульс P , заряд Q , воздействие U , реакция I) и параметры (сопротивление R , проводимость $G=1/R$, ёмкость C , жёсткость $W=1/C$, индуктивность L , дедуктивность $D=1/L$).

В отличие от графа ИЭС граф ЭИМЦ имеет некоторые численные оценки, в частности, вершин графа, и в этом смысле является взвешенным. Однако знание численных оценок вершин графа не позволяет численно оценить структуру в целом и сравнить, например, две структуры по какому-либо показателю. Поставим следующую задачу: численно оценить элемент – блок ИЭС измерительного устройства, для которого известной будет только функция преобразования одной физической величины в другую, т. е. известны названия входной и выходной физических величин элемента. Для решения этой задачи используем систему кинематических величин Р. О. Бартини [6, 7].

Система Бартини. Основными единицами в системе Бартини являются метр и секунда. Фрагмент системы поясняет таблица, в которой в базисе длины L и времени T приведены размерности физических величин. Таблица может быть продолжена в любую сторону путём изменения степеней m, n параметров L^m, T^n . Например, давление имеет размерность L^2T^{-4} или $[м^2 \cdot с^{-4}]$, энергия и статистическая температура – L^5T^{-4} или $[м^5 \cdot с^{-4}]$ и т. д. Числа m, n – любые целые, и для

Система кинематических величин Р. О. Бартини

T	L						
	L^{-1}	L^0	L^1	L^2	L^3	L^4	L^5
T^{-5}	$L^{-1}T^{-5}$	L^0T^{-5}	L^1T^{-5}	L^2T^{-5}	Поверхностная мощность	L^4T^{-5}	Мощность
T^{-4}	$L^{-1}T^{-4}$	L^0T^{-4}	Удельный вес Градиент давления	Давление Напряжение	Поверхностное натяжение Жёсткость	Сила	Энергия Статистическая температура
T^{-3}	$L^{-1}T^{-3}$	L^0T^{-3}	Плотность потока	Напряжённость электромагнитного поля Вязкость	Ток Массовый расход	Импульс	L^5T^{-3}
T^{-2}	Изменение электрической объёмной плотности	Угловое ускорение Массовая плотность	Линейное ускорение	Разность потенциалов	Масса Количество электричества	Магнитный момент	Момент инерции
T^{-1}	Электрическая объёмная плотность	Частота Угловая скорость	Линейная скорость	Обильность двумерная	Расход объёмный	Скорость смещения объёма	L^5T^{-1}
T^0	Кривизна Изменение проводимости	Безразмерная величина Константа Угол	Длина Ёмкость Самоиндукция	Поверхность (площадь)	Объём	Момент инерции плоской фигуры	L^5T^0
T^1	Проводимость	Период	Длительность расстояния	L^2T^1	L^3T^1	L^4T^1	L^5T^1

реального трёхмерного пространства $|m+n|\leq 3$. В таблице Бартини представлены размерности не всех физических величин, однако их можно найти по имеющимся размерностям и известным физическим формулам. Рассмотрим магнитную индукцию B , которая в системе СИ измеряется в теслах. Из закона Ампера следует, что сила F , действующая на проводник с током силой I в магнитном поле с модулем индукции B [8]:

$$F=BI\sin\alpha,$$

где l – длина проводника; α – угол между вектором индукции и проводником.

Находим из таблицы размерности известных величин: силы L^4T^{-4} , электрического тока – L^3T^{-3} , длины – L^1T^0 , $\sin\alpha$ – L^0T^0 . После подстановки размерности в формулу для силы имеем неизвестную размерность магнитной индукции B : L^0T^{-1} или $[с^{-1}]$. Важность LT -таблицы заключается в том, что она выражает физические законы сохранения. Приравнивая размерность ячейки L^1T^0 константе, получаем закон сохранения длины твёрдого тела: $L=const$. Из равенства $L^5T^{-4}=const$ следует закон сохранения энергии. Равенство $L^2T^{-4}=const$ отражает закон Гука. Равенство $L^3T^{-2}=const$ является записью закона Кеплера (отношение куба планетарного радиуса к квадрату периода вращения есть величина постоянная).

Формально LT -базис позволяет избежать дробных степеней размерностей физических величин, а на содержательном уровне – анализировать пространственно-временные и вещественно-полевые ресурсы при решении изобретательских задач [9]. Ресурсы – физические величины в клетках таблицы, они определяют свойства отыскиваемого решения.

Например, некоторый элемент, разрешающий противоречие задачи, должен быть горячим и распределённым по поверхности. При решении задачи математически свойство нагрева задаётся размерностью L^5T^{-4} , т. е. температурой, а геометрическое свойство быть поверхностным – размерностью L^2T^0 . Ресурсную терминологию используем и для моделирования ИЭС измерительных приборов. Ресурсами для построения схем с численной оценкой в виде своей размерности в базе Бартини будут физические величины входов и выходов блоков.

Ресурсоёмкость ИЭС. Ресурсоёмкость физической величины введена в [10] как степень её удаления от абсолютно незатратной физической величины. Абсолютно незатратной физической величиной считается такая величина, которая содержит нулевое значение пространственно-временных и вещественно-полевых ресурсов. В LT -базисе системы Бартини – это безразмерная величина, угол в радианах или поворот точки, которая получается при $m=n=0$, т. е. L^0T^0 . Поворот точки является абсолютно незатратным движением, который движением не является, так как всегда можно утверждать, что точка уже повернута на любой угол.

В LT -таблице введём прямоугольную систему координат m, n с центром в ячейке L^0T^0 . Если из начала координат провести вектор в клетку размерности L^mT^n , тогда ресурсоёмкость будет равна длине этого вектора или евклидовой норме. Например, ресурсоёмкость R энергии (или статистической температуры) будет равна

$$R=\sqrt{m^2+n^2}=\sqrt{5^2+(-4)^2}=\sqrt{41}\approx 6,4.$$

Таким образом, ресурсоёмкость физической величины

определяется числом множителей L^1 , T^{-1} , входящих в формулу размерности. Множители L^1 , T^{-1} в [11] названы генами длины и времени соответственно.

Рассмотрим теперь один элемент или блок ИЭС измерительного устройства с входной величиной x размерностью $L^{m1}T^{n1}$ и выходной величиной y размерностью $L^{m2}T^{n2}$. Математически зададим входную и выходную величины квадратными диагональными 2×2 матрицами, на главных диагоналях которых лежат соответствующие размерности:

$$x = \begin{bmatrix} L^{m1} & 0 \\ 0 & T^{n1} \end{bmatrix}; y = \begin{bmatrix} L^{m2} & 0 \\ 0 & T^{n2} \end{bmatrix}.$$

Назовём x – входной, y – выходной матрицами элемента. Введём передаточную матрицу W элемента как произведение выходной матрицы на матрицу, обратную входной:

$$W = yx^{-1} = \begin{bmatrix} L^{m2} & 0 \\ 0 & T^{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-m1} & 0 \\ 0 & T^{-n1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^{m2-m1} & 0 \\ 0 & T^{n2-n1} \end{bmatrix}.$$

Определитель D передаточной матрицы W даёт размерность некоторой физической величины в LT -системе:

$$D = L^{m2-m1}T^{n2-n1}.$$

Ресурсоёмкость передаточной матрицы определяет ресурсоёмкость элемента ИЭС:

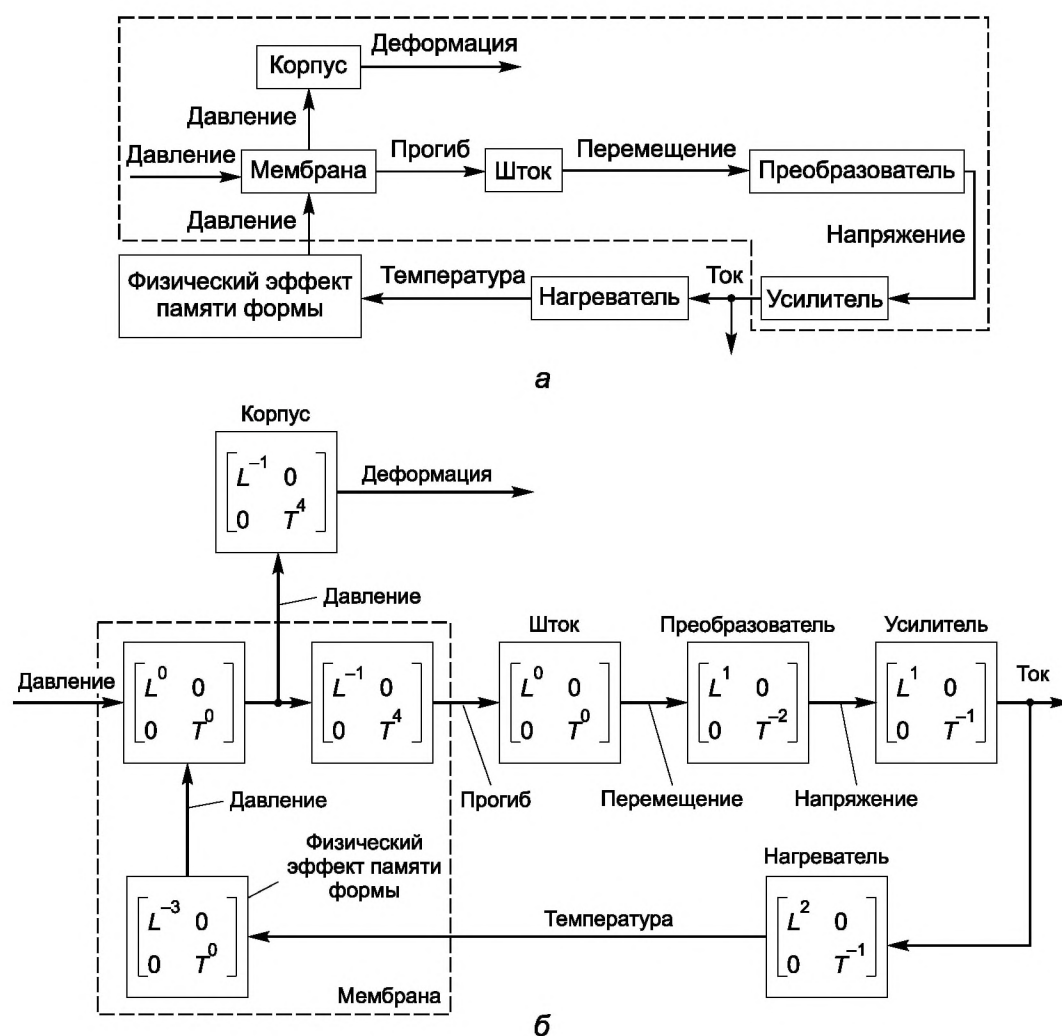
$$R = \sqrt{(m2-m1)^2 + (n2-n1)^2}.$$

Математически показатели степеней $m2-m1$, $n2-n1$ равны количеству операций интегрирования и дифференцирования по времени и длине в уравнении вход-выход элемента ИЭС, т. е. задают порядок уравнения. Ресурсоёмкость всей схемы равняется сумме ресурсоёмкостей всех элементов ИЭС. Рассмотрим пример расчёта ресурсоёмкости ИЭС датчика давления.

Численная оценка ресурсоёмкости ИЭС датчика давления. Внутри корпуса датчика [12] расположена мембрана, выполненная из металла с

памятью формы. На мембране установлен плёночный нагреватель. Под влиянием измеряемого давления мембрана прогибается, в местах крепления воздействует на корпус. Максимальный прогиб мембраны в её центре перемещает шток преобразователя, например индуктивного датчика, электрический сигнал которого даёт информацию о давлении. Одновременно сигнал преобразователя усиливается в усилителе и подаётся на нагреватель. При нагреве мембрана за счёт эффекта памяти формы возвращается в первоначальное состояние. Таким образом в устройстве устанавливается динамическое равновесие между давлением и прогибом.

На основе конструкции в соответствии с [1] составим возможную потоковую ИЭС датчика (рисунок, а), где штриховой линией выделим схему прототипа. Эта схема будет исходной структурой, которую оценим численно. Запишем размерности входных и выходных физических величин блоков схемы: давление L^2T^{-4} , прогиб L^1T^0 , перемещение L^1T^0 , напряжение L^2T^{-2} , ток L^3T^{-3} , температура L^5T^{-4} , деформация L^1T^0 . Передаточные матрицы блоков найдём как произведения выходных матриц на матрицы, обратные входным. Например, для мем-



Потоковые информационно-энергетические схемы датчика давления: исходная (а) и с передаточными матрицами (б)

браны входная (давление) x_1 , выходная (прогиб) y_1 и передаточная W матрицы имеют вид, соответственно:

$$x_1 = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}; y_1 = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix}; W = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix}.$$

Передаточные матрицы остальных элементов рассчитаны аналогично и приведены на рисунке, б внутри соответствующих блоков. Рассчитаем и запишем ресурсоёмкости элементов схемы:

$$R_1 = \sqrt{(-1)^2 + 4^2} = \sqrt{17}; R_2 = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0; R_3 = \sqrt{1^2 + (-2)^2} = \sqrt{5};$$

$$R_4 = \sqrt{1^2 + (-1)^2} = \sqrt{2}; R_5 = \sqrt{2^2 + (-1)^2} = \sqrt{5}; R_6 = \sqrt{(-3)^2 + (0)^2} = 3;$$

$$R_7 = \sqrt{(-1)^2 + 4^2} = \sqrt{17},$$

где $R_1, \dots, R_7$ – ресурсоёмкости соответственно мембраны, штока, преобразователя, усилителя, нагревателя, физического эффекта памяти формы, корпуса.

Общая ресурсоёмкость схемы $R=18,55$.

Применение оценки для ИЭС измерительных устройств. В задачах анализа ИЭС оценка позволяет численно сравнивать схемы двух или нескольких устройств, выполняющих одинаковую функцию преобразования входной величины в выходную. Минимальная ресурсоёмкость достигается в ИЭС, состоящей из одного блока, на основе одного известного физического эффекта. В схеме датчика (см. рисунок, б) передаточная матрица W от давления к электрическому току равна произведению передаточных матриц элементов прямой ветви схемы (мембраны, штока, преобразователя, усилителя) и имеет минимальную ресурсоёмкость $R_{\min} = 1,41$:

$$W = \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}.$$

В тоже время реальная ресурсоёмкость той же ветви равна сумме $R=R_1+R_2+R_3+R_4=7,77$. Таким образом, реальная ИЭС обладает структурной избыточностью по сравнению с минимальной схемой, в которой сокращается количество генов длины и времени при умножении передаточных матриц элементов.

В задачах синтеза измерительных устройств численная оценка позволяет построить структуру оптимальной ИЭС с минимальной ресурсоёмкостью. Алгоритм нахождения физического принципа действия заключается в следующем. По заданным входной и выходной величинам находится передаточная матрица измерительного устройства с минимально возможной ресурсоёмкостью. Если не существует подходящего физического эффекта для её реализации, матрица устройства имеет вид произведения двух или более передаточных матриц с общей ресурсоёмкостью, как можно меньше отличающейся от минимально возможной. Например, для рассматриваемого датчика давление L^2T^{-4} преобразуется в силу L^4T^{-4} , сила – в электрический заряд L^3T^{-2}

в соответствии с пьезоэффектом, заряд – в электрический ток L^3T^{-3} . Конструкция такого устройства может представлять конус (или пирамиду), основание которого воспринимает измеряемое давление. Вершина конуса установлена на грани пьезокристалла, к его другим граням подключается резистор. Передаточная матрица W для него определяется как

$$W = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}.$$

Ресурсоёмкость устройства $R=5,236$ меньше, чем датчика с мембраной ($R=7,77$).

Заключение. Поточковые ИЭС для одного и того же измерительного устройства могут быть составлены по-разному. Рекомендуется их составлять так, чтобы ресурсоёмкость схемы была минимальной, но был понятен физический принцип действия блоков устройства. Такое требование характерно для патентных документов. Кроме одномерных измерительных устройств и блоков с одним входом-выходом, ИЭС может быть многомерной. В этом случае можно рассматривать ресурсоёмкость от i -го входа к j -му выходу, причём входами могут быть как полезные воздействия, так и мешающие возмущения, влияющие на качество преобразования полезного сигнала. Следовательно, оценивать схему можно с точки зрения отношения сигнал-шум.

Фактически по ресурсоёмкости оценивается количество операций интегрирования и дифференцирования по времени и пространственной координате в законах преобразования входной величины в выходную. Операции считаются равнозначными. Однако свойства интегрирования и дифференцирования можно разделить. Операции интегрирования приводят к сглаживанию и накоплению информации, т. е. снижению скорости преобразования, а операции дифференцирования ускоряют процесс преобразования и дают полезный эффект в виде прогнозирования процессов за счёт вычисления скоростей. Следовательно, можно сравнивать разные ИЭС по количеству интеграторов и дифференциаторов в передаточной матрице.

Можно также разделять пространственные и временные свойства ИЭС, считая по аналогии с переменным электрическим током пространственный ресурс реактивным (в пространстве можно вернуться в то же самое положение), а временной ресурс активным, расходуемым. В [10] в таблицу Бартини введён комплексный базис, где по вещественной оси откладывается показатель n степени времени, а по мнимой оси – показатель m степени длины в размерности физической величины. В комплексном базисе можно рассчитать затраты временных ресурсов относительно общих затрат времени и пространства и найти $\cos\varphi$ как отношение показателя степени при времени к корню квадратному из суммы квадратов показателей степени при времени и длине. Например, для пьезоэлектрического эффекта (преобразование силы в электрический заряд) $\cos\varphi=0,894$, для эффекта Архимеда (преобразование объёма в подъёмную силу) $\cos\varphi=0,97$.

Л и т е р а т у р а

1. Половинкин А. И. Основы инженерного творчества. СПб.: Изд-во «Лань», 2007.
2. Голдовский Б. И., Вайнерман М. И. Рациональное творчество. О направленном поиске новых технических решений. М.: Речной транспорт, 1990.
3. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Петрозаводск: Скандинавия, 2004.
4. Зарипов М. Ф., Петрова И. Ю. Энергоинформационный метод анализа и синтеза чувствительных элементов систем управления // Датчики и системы. 1999. № 5. С. 10–17.
5. Zaripova V., Petrova I., Kravets A., Evdoshenko O. Knowledge bases of physical effects and phenomena for method of Energy-Informational Models by means of ontologies // Pros. First Conf. CIT&DS: Creativity in Intelligent Technol. and Data Sci. 2015. Volgograd, Russia: Springer, 2015. P. 224–237.
6. Бартини Р. О., Кузнецов П. Г. О множественности геометрий и множественности физик // Проблемы и особенно-

сти современной научной методологии. 1978. С. 55–65.

7. Петров А. Е. Тензорный метод Крона, LT метод Бартини–Кузнецова и двойственные сети // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. 2010. Т. 6. № 4 (9). С. 46–48.

8. **Общая физика:** учебное пособие / Под ред. А. А. Воробьева. М.: КНОРУС, 2016.

9. Bushuev A. Physico-Mathematical Resources Search // TRIZ J. 2008. January.

10. Бушуев А. Б. Векторный анализ ресурсов // Развитие инструментов решения изобретательских задач: Сборник научных работ. Библиотека Саммита Разработчиков ТРИЗ. 2008. Вып. 2. С. 48–57.

11. Бушуев А. Б. Применение методов технического творчества в инновационной деятельности. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011.

12. Пат. 1472773 РФ. Датчик давления / Блайвас А. С., Филиппова Н. В., Штыков А. П. // Открытия. Изобретения. 1989. № 4.

Дата принятия: 26.04.2017.

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

681.2:53.082.52:535.016

Метод измерения спектра размеров взвешенных наночастиц

В. В. СЕМЁНОВ, Ю. Г. АСЦАТУРОВ, Ю. Б. ХАНЖОНКОВ

*Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: vvsemenov@mail.ru*

Предложен новый метод измерения спектра размеров взвешенных наночастиц, основанный на укрупнении частиц за счёт их конденсационного роста в среде пересыщенного пара и измерении параметров выросших капель. Метод позволяет уменьшить нижний предел измерения до нескольких нанометров, а также хранить и в дальнейшем использовать массивы данных о спектре размеров наночастиц.

Ключевые слова: оптико-электронное устройство, спектр размеров наночастиц, ядра конденсации, укрупнение частиц, устройство конденсационного роста, телевизионный метод.

A new method for measuring the size spectrum of suspended nanoparticles based on particle enlargement due to their condensation growth in a supersaturated vapor medium and measuring the parameters of droplets grown is proposed. The method allows to reduce the lower limit of measurement to several nanometers, and also to store and further use arrays of data on the spectrum of nanoparticle sizes.

Key words: opto-electronic device, range of nanoparticle sizes, condensation nuclei, enlargement of particles, the device condensation growth, the TV method.

В связи с широким применением нанотехнологий в различных областях, таких как биотехнология, медицина, энергетика, оптика и фотоника, актуальна задача измерений параметров аэрозолей и частиц взвесей нанометрового диапазона. В настоящее время существуют несколько стандартных методов измерений размера частиц: метод, базирующийся на особенностях дифракции лазерного излучения

на частицах; динамическое рассеяние света в водных средах (для частиц размером до 3 нм); метод на основе дифференциальной электрической подвижности наночастиц (в диапазоне от 1 мкм до 7 нм); диффузионная спектроскопия [1–3]. Таким образом, три метода из указанных связаны с использованием оптико-электронных методов контроля.

Среди оптико-электронных методов контроля микроско-