

Системное представление физических величин: визуализация размерностных соотношений физических закономерностей

Анатолий Степанович Чуев

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, chuev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3117-3169>

Аннотация. Описан принцип геометрически-размерностного представления физических величин в размерностях Международной системы единиц в виде отдельных системных ячеек на ЛТ-размерностном основании. В зависимости от соотношения размерностей величин в Международной системе единиц и ЛТ-представлении физические величины объединены в отдельные кластеры, которые образуют многоуровневое содержимое большинства системных ячеек. Физические величины внутри кластера имеют ближайшие размерностные связи через длину, время и скорость. Показано, что дальние размерностные связи физических величин, выражающие физические закономерности (без цифровых коэффициентов), представляют собой выделенные параллелограммы или выделенные линии. При этом дополнительные коэффициенты кластерных групп устраняют друг друга, а произведения размерностей физических величин, расположенных на противоположных сторонах выделенного параллелограмма, равны друг другу. Такой системный принцип представления физических величин позволяет не только иллюстрировать известные физические закономерности, но и обнаруживать новые, а также выявлять определённые свойства и особенности расположения квантуемых и константных физических величин в различных вариантах их системного представления. Результаты работы можно применять в учебном процессе и поисковых исследованиях.

Ключевые слова: физические величины, размерности, система физических величин, визуализация закономерностей, квантуемые и константные величины

Для цитирования: Чуев А. С. Системное представление физических величин: визуализация размерностных соотношений физических закономерностей // Измерительная техника. 2022. № 9. С. 18–23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-18-23>

System representation of physical quantities: visualization of dimensional relations of physical laws

Anatoly S. Chuev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, chuev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3117-3169>

Abstract. The principle of the geometrical-dimensional representation of physical quantities in system SI dimensions in the form of separate system cells on the LT-dimensional basis is described. Depending on the ratio of dimensions of quantities in SI and LT representations, the physical quantities are combined into separate clusters, which form the multilevel content of most system cells. The physical quantities of each cluster have nearest dimensional relations through, length, time, and velocity. The distant dimensional relations of physical quantities expressing physical regularities (without participation of numerical coefficients) have the form of selected parallelograms or selected lines (when a parallelogram looks as if in profile). The additional coefficients of cluster groups cancel each other, and the products of dimensions of physical quantities located on opposite sides of the selected parallelogram are equal to each other. This allows us not only to illustrate the known regularities, but also to discover new ones. In different variants of the system representation of physical quantities certain properties and peculiarities in the arrangement of quantized and constant physical quantities are observed.

Keywords: physical quantities, dimensions, system of physical quantities, visualization of regularities, quantifiable and constant quantities

Введение. Системное размерностное представление физических величин позволяет наглядно демонстрировать их закономерные соотношения без цифровых множителей. В плоском изображении физические закономерности имеют вид выделенных параллелограммов и линий. Система и иллюстрируемые в ней закономерности выглядят по-разному в зависимости от взаимного расположения базовых квантуемых и константных величин – момента

импульса, электрического заряда, магнитного потока, а также электрических сопротивления и проводимости. Плоское изображение многослойной системы с расположением электрического заряда в ячейке размерностью L^3T^{-1} имеет наибольшие компактность, симметрию и визуализацию большинства величин.

Цель работы – иллюстрация целостности размерностной системы физических величин, которая проявляется

в наглядном изображении закономерных взаимосвязей величин для различных вариантов исполнения системы.

Системное представление физических величин. Первым вариантом системного представления физических величин можно считать кинематическую систему известного советского авиаконструктора Р. Бартини [1, 2]. При построении системы Бартини использовал LT-размерностную систему представления физических величин. В этой системе впервые была обнаружена определённая системная закономерность расположения величин в виде так называемой димензиональной последовательности. Димензиональная последовательность в системе Бартини пролегла вдоль диагонали и характеризовалась регулярным увеличением размерности величин, расположенных по горизонтали слева направо, на размерность скорости. Физические закономерности в системе Бартини трактовались как законы сохранения, соответствующие определённым ячейкам этой системы.

Визуализация физических закономерностей в системе физических величин. Возможность визуализации физических закономерностей в подобной системе выявилась при переходе от LT-размерностного представления величин к общепринятым размерностям Международной системы единиц (СИ) [3, 4]. При этом рассматриваемая система физических величин и закономерностей (ФВиЗ) оказалась многоуровневой и в ней удалось обнаружить не только ближайшие связи величин через *время*, *длину* и *скорость*, но и дальние размерностные связи определённого типа.

Большинство размерностных связей в системе ФВиЗ выражают формулы физических закономерностей (без цифровых коэффициентов), которые легко обнаруживаются в системе и при необходимости визуализируются в виде выделенных параллелограммов или выделенных линий. Визуализация физических закономерностей более наглядна в плоских частных изображениях системы ФВиЗ при виде сверху на все уровни. Однако при этом многие величины оказываются друг над другом в одной системной ячейке, из-за чего не всегда можно обойтись одним плоским изображением системы. Основанием для любых плоских изображений многослойной системы остаётся та же двумерная LT-размерностная система Бартини [1, 2], но как бы повернутая на 45° .

Физические закономерности, связывающие до четырёх величин, в системе ФВиЗ иллюстрируются выделенными параллелограммами или линиями. Эти фигуры характеризуются определённым соотношением размерностей физических величин, расположенных в ячейках на смежных или противоположных вершинах выделенного параллелограмма. В LT-системе это условие обеспечивается для любых выделенных линий и параллелограммов в силу топологии расположения величин.

Размерности физических величин в СИ отличаются от их LT-размерностного представления дополнительными размерностными коэффициентами G , k [4]. Коэффициент G представляет собой уточнённое (на 4π) значение гравитационной постоянной, а k – числовое соотношение в СИ

единиц измерения *массы* и *силы тока*, полученное с учётом соотношений силовых взаимодействий для этих параметров. В системе ФВиЗ с использованием размерностей СИ определённое соотношение размерностей величин в ячейках на смежных или противоположных вершинах выделенного параллелограмма обеспечивается взаимным устранением дополнительных размерностных коэффициентов G , k . Причём при перемножении (делении) размерностей величин взаимное устранение происходит, если выделенный параллелограмм (или выделенная линия) выражает определённую физическую закономерность.

Система ФВиЗ в размерностях СИ многоуровневая, однако её изображения, используемые в учебной или исследовательской деятельности, всегда плоские. Пример такого плоского изображения системы ФВиЗ с иллюстрацией известных физических закономерностей в области электромагнетизма приведён на рис. 1. Базовыми для этого и других вариантов системы являются шесть величин:

момент импульса $L = mvr$ и *безразмерная величина*, местоположение которых в любом плоскостном представлении системы ФВиЗ остаются неизменными;

электрический заряд q , *магнитный поток* Φ , а также электрические *проводимость* $1/R$ и *сопротивление* R (см. рис. 1, ячейки с красными полужирными границами).

Отметим также, что в системе ФВиЗ используется несколько изменённый вид размерностей – не длина L , а масса M находится на первом месте, что явно ближе к формульному отображению многих физических величин ($F = ma$; $P = mv$ и др.).

Конкретные свойства и взаимосвязи в системе ФВиЗ.

В правом нижнем углу изображения плоской системы ФВиЗ обычно приводится мнемоническая картинка, показывающая правило построения выделенных параллелограммов или линий. Эта картинка способствует обнаружению законов, которые в том или ином частном изображении многоуровневой системы ФВиЗ могут быть не видны.

В варианте системы ФВиЗ по типу рис. 1, 2 все физические величины достаточно компактно расположены и их визуализации обычно хватает. Удобство применения данного варианта системы широко проверено в учебном процессе на кафедре физики МГТУ им. Н. Э. Баумана. Кроме компактности и удобства использования, этот вариант системы характеризуется системными кластерами с величинами со сходными физическими свойствами, а также отдельными горизонтальными рядами с сохраняющимися физическими величинами и отдельно квантуемыми и константными величинами. В горизонтальный ряд сохраняющихся величин входят *энергия* W , *импульс* P , *масса* m (не показана на рис. 1, 2), *длина* l и *время* t . Выше этого ряда находится горизонтальный ряд, состоящий в основном из квантуемых и константных величин: *момента импульса* L , *электрического заряда* q и *проводимости* $1/R$. Элементарными квантами последних указанных величин являются постоянная Планка h , элементарный заряд q_e и квант электрической проводимости. Другие физические величины, системно связанные с моментом импульса, электрическими

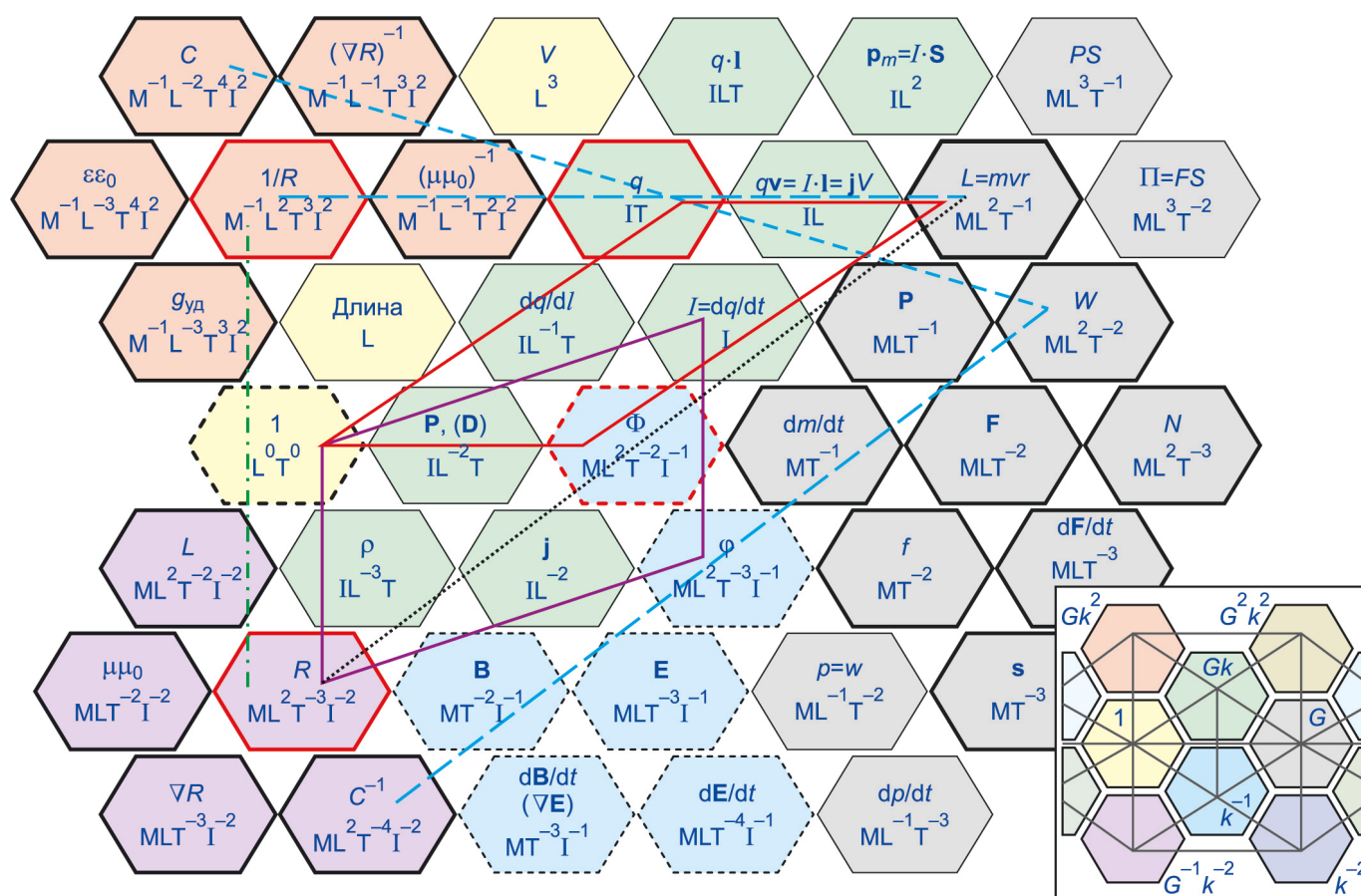


Рис. 1. Плоское изображение системы физических величин с визуализацией межкластерных связей, иллюстрирующих закономерности

Fig. 1. A flat image of a system of physical quantities with visualization of intercluster connections illustrating patterns

зарядом и проводимостью, обычно тоже являются квантуемыми или константными.

Рассмотрим связи между величинами. Выделенный параллелограмм красного цвета (см. рис. 1), содержащий электрический заряд q , момент импульса и магнитный поток Φ , иллюстрирует формульное соотношение их квантов:

$$h/(2q_e) = \Phi_0, \quad (1)$$

где q_e – элементарный электрический заряд; Φ_0 – квант магнитного потока.

Часть выделенных линий (см. рис. 1) характеризует следующие физические закономерности с участием фундаментальных физических констант:

обратную зависимость $g = R^{-1}$ электрической проводимости g от сопротивления R ;

зависимость постоянной фон Клитцинга ($R_K = 25812$ Ом)

$$R_K = h/q_e^2 = g_K^{-1}, \quad (2)$$

определяемую в виде обратной электрической проводимости или отношения постоянной Планка к квадрату элементарного электрического заряда;

связь постоянной фон Клитцинга с квантом магнитного потока Φ_0 и постоянной Планка

$$R_K = 4\Phi_0^2/h. \quad (3)$$

Выделенный параллелограмм фиолетового цвета на рис. 1 иллюстрирует закон Ома, а другие выделенные линии – формулы, описывающие энергию заряженной ёмкости:

$$\Delta\phi = U = IR; W = CU^2/2; W = q^2/(2C),$$

где $\Delta\phi$ – разность электрических потенциалов; U, I – напряжение и сила тока; C – ёмкость.

Отметим, что формулы, в отличие от размерностных соотношений физических величин, могут содержать безразмерные числа, которые в системе не обнаруживаются.

Поскольку на одном плоском изображении системы трудно показывать все возможные закономерные соотношения присутствующих в ней величин, а часть величин многоуровневой системы вообще не видна, то приходится использовать несколько плоских изображений. Особенно часто это используется при иллюстрации системой ФВиЗ законов из разных разделов физики.

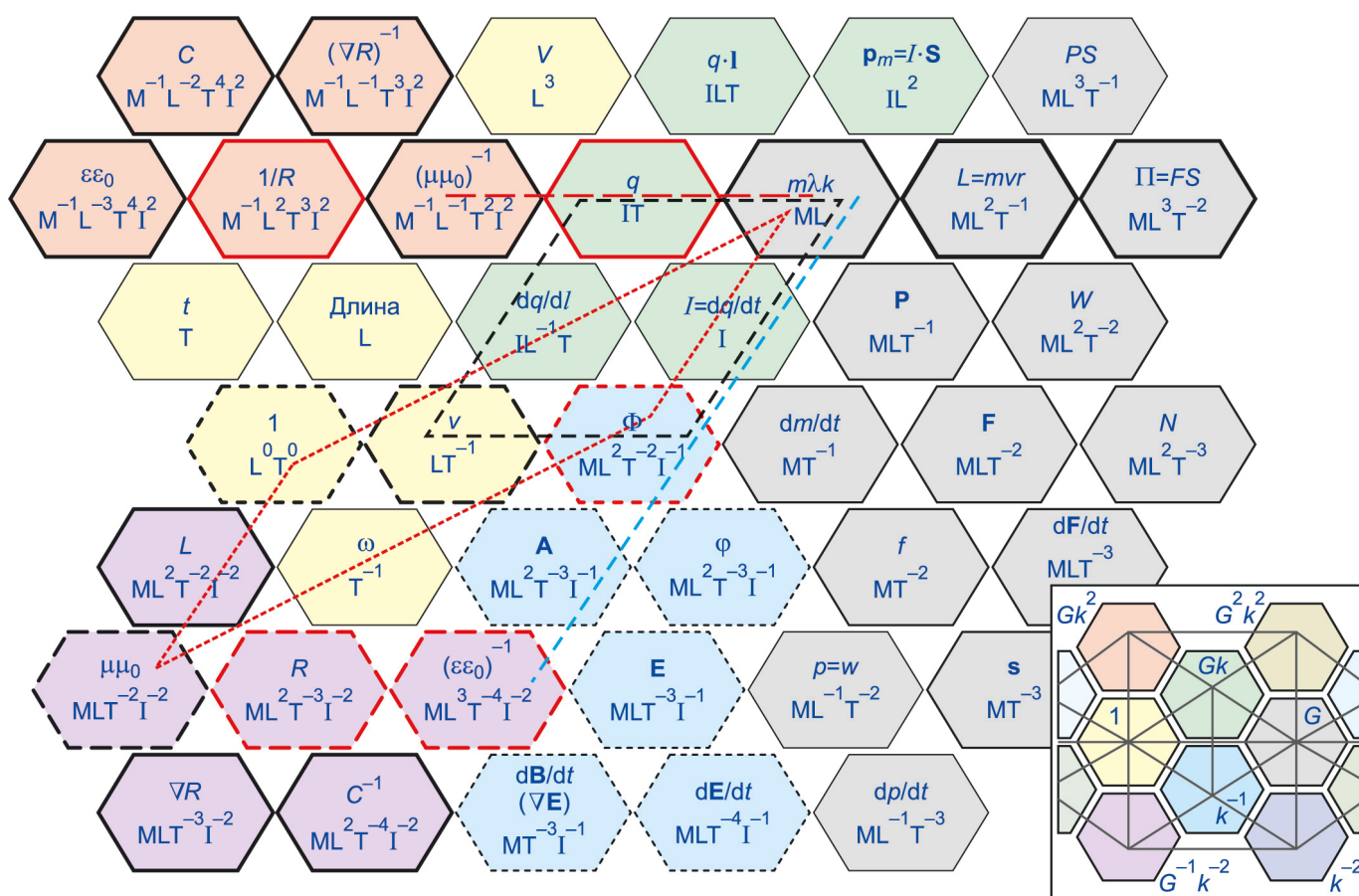


Рис. 2. Системные соотношения физических величин с участием квантов локализации массы и линейного элемента тока

Fig. 2. System relations involving mass localization quanta and the linear current element

На рис. 2 показаны системные соотношения с участием новых и пока ещё малоизвестных константных величин: *элемента тока* $(II)_{\text{кв}}$ (показан на рис. 1) и *локализации массы* $(m\lambda_k)$, где λ_k – комптоновская длина волны электрона. В данном варианте системы обе величины располагаются в одной и той же системной ячейке, поэтому обычно одна величина скрыта за второй. Однако каждую величину, если она визуально не представлена, легко найти в системе ФВиЗ исходя из её размерности. Например, *локализация массы* есть произведение *массы* на *длину*, а *элемент тока* есть произведение *электрического заряда* на *скорость* (на рис. 1 ячейка $(II)_{\text{кв}}$). При умножении на скорость надо делать горизонтальный переход на одну ячейку правее в том же кластере системы. Более подробно о системном расположении физических величин и их взаимосвязях в системе изложено в публикациях [5, 6].

Вариант системы (см. рис. 1, 2) примечателен тем, что в нём есть главный системный ряд (или пояс) квантуемых и константных величин, расположенных на одном горизонтальном уровне. При этом все базовые квантуемые и константные величины, определяющие системное расположение их кластеров, весьма удобно расположены относительно друг друга для плоского однорисуночного изображения системы.

На рис. 2 выделенные параллелограммы и линии иллюстрируют системные связи квантов *локализации массы* $m_e \lambda_k / \Phi_0 = 2q_e / c$; $m_e \lambda_k = q_e^2 \mu_0 / (2\alpha)$; $m_e \lambda_k = 8\alpha \varepsilon_0 \Phi_0^2$ и *линейного элемента тока* $(II)_{\text{кв}} = 4\Phi_0 / \mu_0$, где m_e – масса электрона; α – постоянная тонкой структуры; μ_0 , ε_0 – магнитная и электрическая постоянные.

Первое упоминание о кванте *локализации массы* встречается в работах Ф. М. Канарёва [7]. Квант *элемента тока* системно обнаружен автором настоящей статьи, по-видимому, впервые. Указанное выше значение кванта *элемента тока* отличается на 2α от значения *элемента тока*, приведённого в [5], и требует экспериментального уточнения. Подобное экспериментальное уточнение необходимо и для кванта *локализации массы*.

В рассмотренном варианте системы можно найти следующие закономерные соотношения физических величин с квантуемыми и константными величинами (частично показаны на рис. 1, 2 в размерностном виде):

$g_{\text{кв}} = 2R_K^{-1}$ (квант электрической проводимости);
 $R_B = 2\alpha R_K = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0} = \mu_0 c \approx 376$ Ом (волновое сопротивление вакуума);
 $q_e = 4\alpha \Phi_0 / R_B$ (связь элементарного заряда с квантом магнитного потока);

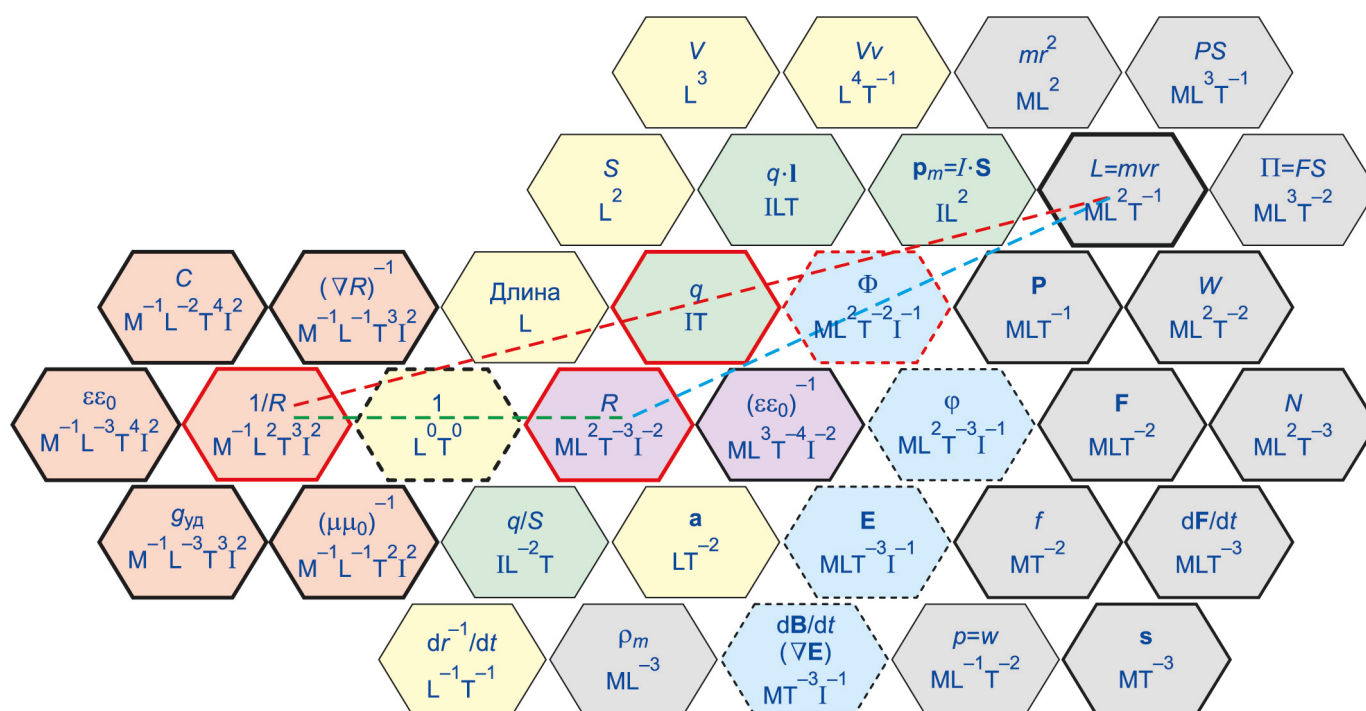


Рис. 3. Вариант системы физических величин и закономерностей; электрический заряд расположен в ячейке с размерностью $L^2 T^{-1}$

Fig. 3. Version of the system of physical quantities and laws; the electric charge is located in a cell of dimension $L^2 T^{-1}$

$q_e^2/\epsilon_0 = 4\pi m_e r_e c^2$ (квант потенциального действия силы $\Pi = FS$);

$q_e^2/\epsilon_0 = 16\alpha^2 \Phi_0^2/\mu_0$ (степенная связь квантов электрического заряда и магнитного потока);

(II)_{кв} = $JS = 8\alpha \Phi_0/\mu_0 = 2q_e c$ (связь кванта *линейного элемента тока* или кванта *потока намагниченности JS* с квантом *магнитного потока* Φ_0 и магнитной постоянной);

$\lambda_K = h/(m_e c) = 2\pi r_e/\alpha$ (комптоновская длина волны электрона);

$m_e \lambda_K = h/c$ (квант локализации массы);

$h/2q_e = \Delta\varphi/v = \Phi_0$ (квантовое системное соотношение для значений частоты в эффекте Джозефсона);

$\Phi_0^2/\mu_0 = hc/(8\alpha) = \pi G m_\Pi^2/(4\alpha)$ (системные соотношения с участием гравитационной постоянной G и планковской массы $m_\Pi = 2,176713 \cdot 10^{-8}$ кг), где c – скорость света; r_e – классический радиус электрона; v – частота.

Гравитационная постоянная и обратная ей величина расположены в системной ячейке с безразмерной постоянной, но на своих системных уровнях.

Плоские изображения системы ФВиЗ с иллюстрацией закономерных размерностных соотношений физических величин могут иметь различный вид. На рис. 3 представлен вариант системы, в котором изменено системное место расположения электрического заряда. Три линии соединяют опорные (базовые) величины, относящиеся к константным и квантуемым величинам.

Из рис. 3 следует, что изменение места расположения электрического заряда всего лишь на одну ячейку приводит к значительному изменению системного изображения.

Однако взаимное расположение квантуемых, константных и всех остальных величин остаётся практически неизменным, поскольку соответствует физическим закономерностям. Данный вариант системы обычно используется, если требуется расположить некоторые величины не в одной, а в разных системных ячейках. Например, для визуализации физической закономерности с одновременным присутствием кванта элемента тока и константы локализации массы.

Системное представление ФВ не на размерностных связях, а на иных принципах описано в работах [8–12]. Однако наглядное представление физических закономерностей в таких системах практически невозможно или крайне затруднительно.

Закключение. Системное размерностное представление физических величин в предлагаемом варианте наиболее подходит для поиска неизвестных физических закономерностей и для обучения. Преимуществами этого варианта являются достаточные компактность и наглядность изображений, определённая симметрия структуры и, самое главное, простота поиска системного расположения и взаимных связей всех физических величин.

Список источников

1. Бартини Р. Л. Некоторые соотношения между физическими константами // Доклады Академии наук СССР. 1965. Т. 163. № 4. С. 861–864.

2. Бартини Р. Л. Соотношение между физическими величинами // Проблемы теории гравитации и элементарных частиц / Под ред. К. П. Станюковича и Г. А. Соколика. М.: Атомиздат. 1966. Вып. 1. С. 249–266.

3. Чувев А. С. Система физических величин и закономерных размерностных взаимосвязей между ними // Законодательная и прикладная метрология. 2007. № 3. С. 30–33.

4. Чувев А. С. О размерностных и числовых соотношениях фундаментальных физических констант в системах ЛТ и СИ // Мир измерений. 2017. № 2. С. 44–49.

5. Чувев А. С. Системные и математические соотношения квантуемых и константных физических величин (Часть 1) // Мир измерений. 2021. № 4. С. 44–47.

6. Чувев А. С. Системные и математические соотношения квантуемых и константных физических величин (Часть 2) // Мир измерений. 2022. № 1. С. 28–30.

7. Канарёв Ф. М. Физхимия микромира. Учебник. Краснодар, 2002.

8. Коган И. М. Системы физических величин и системы единиц измерений – принципиально различные понятия [Электрон. ресурс]. URL: http://www.kogan.iri-as.org/stat/02_systems.pdf (дата обращения: 01.08.2022).

9. Викулин В. Система физических величин в размерности ЛТ без подгоночных коэффициентов [Электрон. ресурс]. URL: http://electricaleather.com/d/358095/d/lt5_norm1.pdf (дата обращения: 01.08.2022).

10. Бессонов Е. А. Логическая система физических величин // Электронный журнал SCI-ARTICLE.RU. № 15. 2014. URL: <https://sci-article.ru/stat.php?i=1416218904> (дата обращения: 01.08.2022).

11. Многоуровневая система физических величин СИ Е. А. Бессонова [Электрон. ресурс]. URL: <https://system-units-si.ru.gg/> (дата обращения: 01.08.2022).

12. Плотников Н. А. Система физических величин. ВОИР и Вологодский Областной Совет ВОИР. Вологда. 1978. URL: <http://www.plotnikovna.narod.ru/> (дата обращения: 01.08.2022).

References

1. Bartini R. L., Some relations between physical constants, *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1965, vol. 163, no. 4, pp. 861–864. (In Russ.)

2. Bartini R. L., Sootnoshenie mezhdru fizicheskimi velichinami, in *Problemy teorii gravitacii i elementarnyh chastic*, eds. K. P. Stanyukovich and G. A. Sokolik, Moscow, Atomizdat Publ., 1966, vol. 1, pp. 249–266. (In Russ.)

3. Chuev A. S., The system of physical quantities and regular dimensional interrelations between them, *Legislative and applied metrology*, 2007, no. 3, pp. 30–33. (In Russ.)

4. Chuev A. S., Regarding dimensional and numerical relationships of fundamental physical constants in the LT and SI systems of units, *Measurements world*, 2017, no. 2, pp. 44–49. (In Russ.)

5. Chuev A. S., System and mathematical relationships of quantized and constant physical quantities (ending in the next issue), *Measurements world*, 2021, no. 4, pp. 44–47. (In Russ.)

6. Chuev A. S., System and mathematical relationships of quantifiable and constant physical quantities (ending), *Measurements world*, 2022, no. 1, pp. 28–30. (In Russ.)

7. Kanarev F. M., *Fizkhimiya mikromira* [Phischemy of the microworld], Textbook, Krasnodar, 2002. (In Russ.)

8. Kogan I. M., *Sistemy fizicheskikh velichin i sistemy edinic izmerenij – principial'no razlichnye ponyatiya* [Systems of physical quantities and systems of measurement units – fundamentally different concepts] [Electronic resource], available at: http://www.kogan.iri-as.org/stat/02_systems.pdf (accessed: 01.08.2022). (In Russ.)

9. Vikulin V., *Sistema fizicheskikh velichin v razmernosti LT bez podgonochnyh koefficientov* [System of physical quantities in LT dimension without fitting coefficients] [Electronic resource], available at: http://electricaleather.com/d/358095/d/lt5_norm1.pdf (accessed: 01.08.2022). (In Russ.)

10. Bessonov E. A., *Logicheskaya sistema fizicheskikh velichin* [Logical system of physical quantities], *SCI-ARTICLE.RU Electronic magazine*, № 15, 2014, available at: <https://sci-article.ru/stat.php?i=1416218904> (accessed: 01.08.2022). (In Russ.)

11. *Mnogourovnevaya sistema fizicheskikh velichin SI* E. A. Bessonova [Multilevel system of physical quantities of SI by E. A. Bessonov] [Electronic resource], available at: <https://system-units-si.ru.gg/> (accessed: 01.08.2022). (In Russ.)

12. Plotnikov N. A., *Sistema fizicheskikh velichin* [System of physical quantities], VOIR i Vologodskij Oblastnoj Sovet VOIR Publ., Vologda, 1978, available at: <http://www.plotnikovna.narod.ru/> (accessed: 01.08.2022). (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 22.05.2022; одобрена после рецензирования 30.07.2022; принята к публикации 02.08.2022.
The article was submitted 22.05.2022; approved after reviewing 30.07.2022; accepted for publication 02.08.2022.