

УДК 536(07)

Горбачук І. Т., Стариков С. М.  
Національний педагогічний університет  
імені М. П. Драгоманова

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСТРАСТРУМІВ ЗАМИКАННЯ І РОЗМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЩО МІСТИТЬ АКТИВНИЙ ОПІР І ЄМНІСТЬ

У статті подані результати дослідження швидкоплинних електромагнітних процесів в електричному колі джерела постійного струму, що містить активний опір і ємність. Експериментальні дослідження проведені за допомогою універсального комп'ютерно-вимірювального комплексу з аналого-цифровим перетворювачем. Отримані результати аналізуються в межах представленої в роботі теорії. Дослідження проведені в режимі реального часу.

**Ключові слова:** навчання фізики у вищій школі, дослідження екстремумів, джерело електричного струму.

У курсі фізики вищої школи розглядаються процеси, в яких напруга та струм або незмінні в часі (електричні кола постійного струму), або ж є періодичними функціями часу (електричні кола змінного струму). Однак встановленню зазначених режимів роботи електричного кола завжди передують перехідні процеси, при якому напруга і струм змінюються не періодично. Перехідні процеси виникають в електричних системах як при нормальній експлуатації (вмикання та вимикання джерела живлення, навантаження окремих гілок кола тощо), так і за аварійних умов (розрив електричного кола, коротке замикання, вихід з ладу окремих частин системи). Вивчення перехідних процесів необхідне, насамперед, для всебічного розуміння причин виникнення та фізичної суті цих процесів з метою передбачити та завчасно усунути їх негативні наслідки.

Процеси заряджання та розряджання конденсатора відносяться до перехідних. Для їх дослідження можна застосувати закони Ома та правила Кірхгофа. Застосовність законів постійного струму обумовлюється умовою квазістаціонарності. Якщо відстань між найбільш віддаленими точками електричного кола  $l$ , а швидкість поширення електромагнітного поля вздовж лінії кола  $U$ , то найбільший час, необхідний для поширення поля у колі,  $\tau = \frac{l}{U}$ . Тоді умова квазістаціонарності запишеться так:  $\tau \ll T$ , де  $T$  – період змін, що відбуваються в електричному колі.

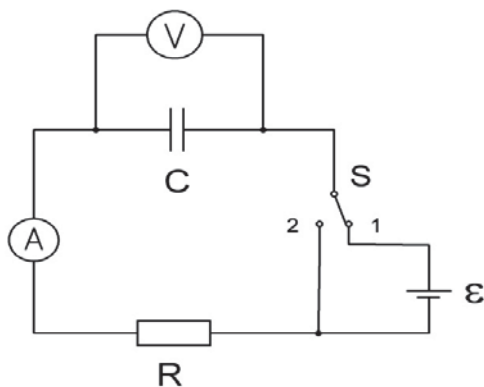


Рис. 1

Основним науковим завданням було: провести теоретичні розрахунки та дослідити експериментально за допомогою комп'ютерно-вимірювального комплексу в режимі реального часу характер швидкоплинних електромагнітних процесів, що відбуваються в електричному колі джерела постійного струму з активним опором і ємністю в моменти замикання і розмикання електричного кола.

Замкнувши перемикач S на контакт 1 (рис. 1) електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора C, активного опору R і джерела постійного струму з ЕРС  $\varepsilon$ , в початковий момент у колі виникає змінний в часі струм (екстраструм замикання). Важливо зазначити, що струм провідності в зовнішньому колі замикається струмом зміщення в конденсаторі. Дійсно, постійний струм в колі з

конденсатором не проходить, а змінний – проходить. В усіх частинах послідовно з'єднаних провідників миттєве значення змінного струму провідності є однаковим. Між обкладками конденсатора, в діелектрику, вільних зарядів немає і, отже, немає струму провідності. Однак внаслідок поступового заряджання обкладок (зміни їх заряду) між ними виникає вихрове змінне електричне поле, яке утворює вихрове магнітне поле, аналогічне до магнітного поля навколо з'єднувальних провідників поза конденсатором. Зміну в часі індукції електричного поля в діелектрику називають струмом зміщення. Покажемо, що миттєвий струм провідності в колі замикається миттєвим струмом зміщення в конденсаторі. Дійсно, миттєве значення змінного струму провідності в підвідних провідниках  $I = \frac{dq}{dt}$ . Зміна заряду  $q$  на обкладках конденсатора зв'язана зі

змінною потенціалу  $dq = Cd\varphi$ . Для плоского конденсатора  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ . Отже,

$dq = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} d\varphi = \varepsilon\varepsilon_0 ES, \left(\frac{d\varphi}{d} = E\right)$ . Оскільки,  $\varepsilon\varepsilon_0 E = D$  вираз для миттєвої сили струму

перепишеться так:  $I = \frac{dD}{dt} S$ , а густина струму  $j = \frac{dD}{dt} = j_{зм}$ . Отже, струм провідності  $j$  в

підвідних провідниках замикається рівним йому струмом зміщення  $j_{зм}$  між обкладками конденсатора, тобто лінії струму в довільному замкненому електричному колі є також замкненими.

За другим правилом Кірхгофа для квазістаціонарного струму в будь-який момент часу можна записати

$$IR + U = \mathcal{E}, \quad (1)$$

де  $U = \frac{q}{C}$ ,  $I = \frac{dq}{dt}$  ( $q$  – миттєве значення заряду на обкладках конденсатора),  $I$  та  $U$  – миттєві значення сили струму провідності в замкненому електричному колі і напруги на конденсаторі. Підставивши значення  $I$  та  $U$  в рівняння (1), отримаємо  $\frac{dq}{dt} R + \frac{q}{C} = \mathcal{E}$ ; або

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} + \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\mathcal{E}C - q}{RC}.$$

Розділивши змінні,  $\frac{dq}{\mathcal{E}C - q} = \frac{dt}{RC}$  отримуємо диференціальне рівняння.

Проінтегруємо

$$\int \frac{dq}{\mathcal{E}C - q} = \int \frac{dt}{RC} \Rightarrow \frac{1}{RC} \int dt = \int \frac{dq}{\mathcal{E}C - q} \Rightarrow \frac{t}{RC} = \int \frac{dq}{\mathcal{E}C - q} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \mathcal{E}C - q = \psi \\ d\psi = -dq \\ dq = -d\psi \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{t}{RC} = \int \frac{-d\psi}{\psi} \Rightarrow$$

$$\frac{t}{RC} = -\ln \psi + C_1 \Rightarrow \frac{t}{RC} = -\ln(\mathcal{E}C - q) + A,$$

де  $A$  – стала інтегрування.

Врахувавши, що стала інтегрування може набувати будь-яких значень, замінимо її на  $\ln A$  і, використовуючи властивості логарифмів, спростимо останній вираз

$$\frac{t}{RC} = \ln A - \ln(\mathcal{E}C - q) \Rightarrow \frac{t}{RC} = \ln \frac{A}{\mathcal{E}C - q}. \text{ Після потенціювання дістанемо } e^{\frac{t}{RC}} = \frac{A}{\mathcal{E}C - q}.$$

Сталу інтегрування  $A$  знайдемо з початкових умов: при  $t = 0$ ;  $q = 0$ ; звідси  $A = \mathcal{E}C$ . Підставивши значення  $A$  в попереднє рівняння, дістанемо закон зміни заряду на обкладках конденсатора

$$q = \mathcal{E}C(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

Відповідно, закон зміни в часі сили струму в колі

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(\mathcal{E}C - \mathcal{E}Ce^{-\frac{t}{RC}}) = \frac{\mathcal{E}}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

Закон зміни напруги на конденсаторі

$$U = \frac{q}{C} = \mathcal{E}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4)$$

Перемкнувши перемикач  $S$  з контакту 1 на контакт 2 (рис. 1), заряджений конденсатор почне розряджатися і в електричному колі виникне змінний в часі розрядний струм (екстраструм розмикання).

Встановимо закон зміни в часі сили струму в замкненому електричному колі та закон зміни напруги на конденсаторі. За другим правилом Кірхгофа при вимкненому джерелі постійного струму

$$IR + U = 0 \quad (5)$$

В рівності (5)  $I = \frac{dq}{dt}$  – миттєве значення сили струму в колі,  $U = \frac{q}{C}$  – миттєве значення напруги на конденсаторі ( $q$  – миттєве значення заряду конденсатора).

Підставивши  $I$  та  $U$  в рівняння (5), отримаємо

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0, \text{ або } \frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC}.$$

Проінтегруємо останній вираз  $\ln q = -\frac{t}{RC} + \ln A$ , де  $A$  – стала інтегрування. Після

потенціювання одержимо  $q = Ae^{-\frac{t}{RC}}$ . Сталу інтегрування визначимо з початкових умов: при  $t = 0$ ;  $A = q_0$ . Тоді

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

З рівняння (6) видно, що значення заряду конденсатора, внаслідок його розрядження на опір  $R$ , з часом зменшується за експоненціальним законом.

Зміна сили струму в колі

$$I = \frac{dq}{dt}; I = -\frac{q_0}{RC}e^{-\frac{t}{RC}} \quad (7)$$

Як видно з (7) сила струму в початковий момент  $t = 0$  сягає максимального значення  $I_0 = \frac{q_0}{RC}$  і з часом при  $t \rightarrow \infty$  спадає за експоненціальним законом до нуля. Аналогічно змінюється і напруга на конденсаторі

$$U = \frac{q_0}{C} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (8)$$

Дослідження швидкоплинних процесів в електричному колі джерела постійного електричного струму, що містить послідовно з'єднані активний опір і ємність проводилось на спеціальному навчальному стенді, схематичне зображення якого представлено на рис. 2.

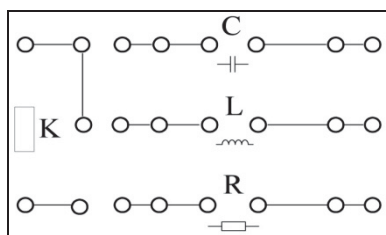


Рис. 2

В експерименті використовувалось джерело постійного струму напругою 12 В, батарея конденсаторів ємністю  $0,5 \div 60$  мкФ і магазин опорів від 0,01 Ом до 100 кОм. Вимірювання проводились за допомогою універсального комп'ютерно-вимірювального комплексу, під'єданого до стаціонарного комп'ютера через USB кабель. Схема досліджувального електричного кола зображена на рис. 3.

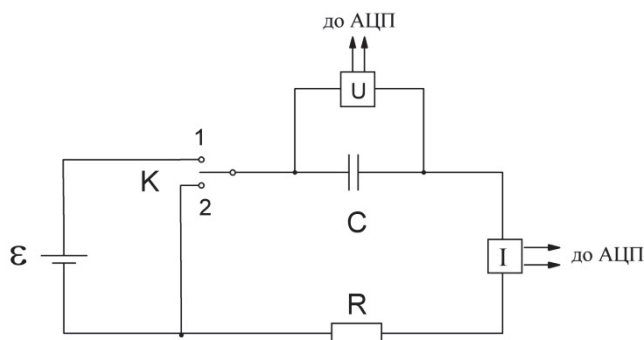


Рис. 3

До батареї конденсаторів  $C$  паралельно приєднувався датчик напруги на  $\pm 25$  В та в коло послідовно вмикався датчик струму  $\pm 2$  А. Засобами програмного забезпечення встановлювався час з ціною поділки шкали 0,2 мс.

Експеримент проводився в два етапи.

Перша частина експерименту полягала у тому, щоб скласти електричне коло за схемою рис.3 і провести серію експериментальних досліджень екстраструму замикання.

З формули (3) видно, що при замиканні ключа  $K$  на контакт 1 (рис. 3) в початковий момент  $t = 0$  сила струму  $I$  майже миттєво зростатиме до максимального значення

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{R}$$
 Причиною цього є те, що омичний опір незарядженого конденсатора  $R_c = 0$ , а в процесі зарядження  $R_c$  зростає і при  $t \rightarrow \infty$  також  $R_c \rightarrow \infty$ , в результаті сила струму експоненціально має спадати до нуля.

З формули (4), в свою чергу, видно, що напруга на конденсаторі з часом має експоненціально зростати в міру зростання заряду на обкладках конденсатора і при  $t \rightarrow \infty$  прямуватиме до значення ЕРС джерела  $\mathcal{E}$ , практично при будь-яких значеннях омичного опору  $R$ , оскільки повністю заряджений конденсатор має опір  $R_c \rightarrow \infty$ .

В серіях дослідів при  $C = \text{const}$  змінювалися значення  $R$  (1, 10, 100, 1000 Ом) і, навпаки, при  $R = \text{const}$  змінювалися значення  $C$  (5, 10, 20, 40 мкФ).

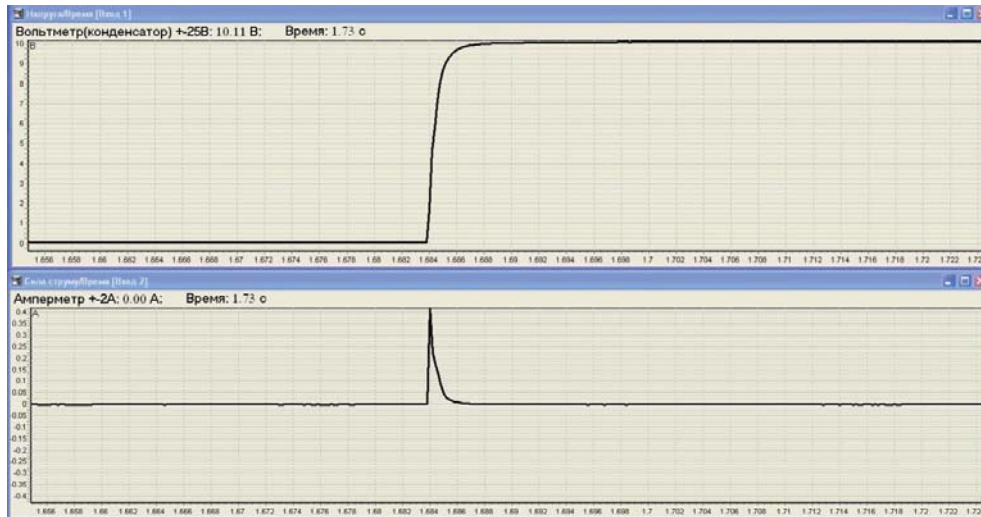


Рис. 4

На рис. 4 представлений типовий характер процесу зміни екстраструму замикання і напруги на конденсаторі при  $C = 40 \text{ мкФ}$ ,  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$ .

На рис. 5 зображено накладання графіків залежностей екстраструму замикання і напруги на конденсаторі від часу при  $C = 20 \text{ мкФ}$ ,  $R = 1 \text{ кОм}$ ,  $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$ .

В другій серії експериментів досліджувалась залежність екстраструму розмикання і напруги на конденсаторі для тих самих співвідношень значень ємностей і опорів при  $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$ .

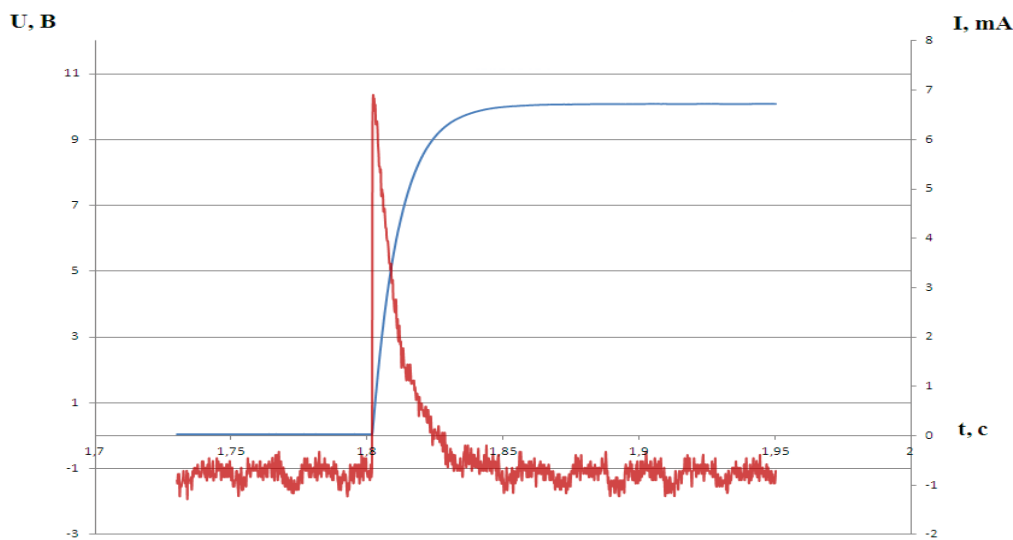


Рис. 5

З формули (7) видно, що при розмиканні електричного кола в момент  $t = 0$  сила струм сягає максимального значення  $I_{\max} = \frac{q_0}{RC}$  з протилежним знаком (змінюється напрям струму, знак (-)), а з плином часу спадає до нуля. Напруга на конденсаторі (формула (8)) при  $t = 0$  рівна практично  $U_{\max} = \frac{q}{C}$  і з часом експоненціально спадає до нуля при  $t \rightarrow \infty$ .

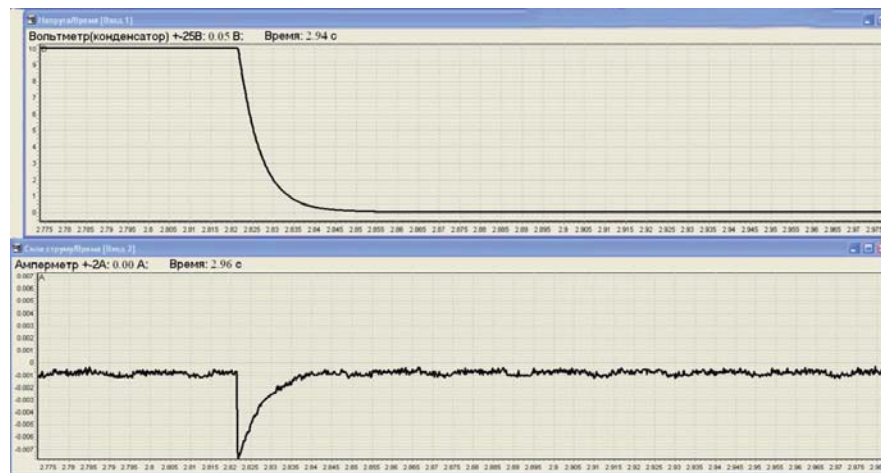


Рис. 6

На рис. 6 представлені графіки зміни екстраструму розмикання і напруги на конденсаторі при  $C = 40$  мкФ і  $R = 10$  Ом.

Дослідження екстраструмів замикання і розмикання показали, що експериментальні результати за характером змін повністю співпадають з теоретичними для всіх серій експериментів. Характерним параметром цих змін є час  $\tau = RC$ , протягом якого екстраструми і напруга на конденсаторі змінюється в  $e$  раз. Цю величину можна назвати електромагнітною сталою часу екстраструмів замикання і розмикання. Розраховуючи  $\tau = RC$  теоретично і визначаючи їх експериментально, можна оцінити міру їх відповідності і встановлювати причини розбіжностей.

У роботі експериментально досліджено характер процесів, що тривають протягом декількох мікросекунд у моменти заряджання та розряджання конденсатора через активний опір. Експериментально підтверджений характер швидкоплинних процесів повністю відповідає теоретичним розрахункам. Проведення експерименту та аналіз отриманих даних став можливим завдяки використанню сучасного комп'ютерно-вимірювального комплексу на основі АЦП.

#### **Використана література:**

1. Горбачук І. Т. Дослідження будови та принципу дії елементів структури аналогово-цифрового перетворювача. Спеціальний фізичний практикум. Частина 3 / І. Т. Горбачук, С. І. Козаренко, В. В. Левандовський та ін. // за заг. ред. проф. Горбачука І. Т. – К. : НПУ імені М. П. Драгоманова, 2011. – 55 с.
2. Калашников С. Г. Электричество. – 5-е изд. / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1985. – 576 с.
3. Кучерук І. М. Загальний курс фізики: навчальний посібник. – Т. 2. Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик. – К. : Техніка, 2003. – 452 с.
4. Горбачук І. Т. Дослідження екстраструмів замикання і розмикання в електричному колі джерела постійного струму з RLC елементами / І. Т. Горбачук, С. М. Стариков, С. І. Козаренко // Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова. Серія № 3. Фізика і математика у вищій і середній школі: [збірник наукових праць] / ред. рада: В. П. Андрущенко (голова); Міністерство освіти і науки, Нац. пед. університет імені М. П. Драгоманова, 2012.

**Горбачук І. Т., Стариков С. М. Исследование экстрастоков замыкания и размыкания в электрической цепи источника постоянного тока, который содержит активное сопротивление и емкость.**

*В статье представлены результаты исследования быстротекущих электромагнитных процессов в электрической цепи источника постоянного тока, содержащее активное сопротивление и емкость. Экспериментальные исследования проведены с помощью универсального компьютерно-измерительного комплекса с аналого-цифровым преобразователем. Полученные результаты анализируются в рамках представленной в работе теории. Исследования проведены в режиме реального времени*

**Ключевые слова:** обучение физики в высшей школе, исследование экстремумов, источник электрического тока.

**Gorbachuk I. T., Starikov S. M. Research of eksrtemumes of shorting and breaking in the electric circle of source of direct-current which contains active resistance and capacity.**

*The paper presents the results of a study of fleeting electromagnetic processes in the circuit DC containing resistance and capacitance. Experimental studies were conducted using a universal computer-measuring system with an analog-digital converter. The results are analyzed in the framework presented in the theory. The studies were performed in real time.*

**Keywords:** studies of physics at higher school, research of eksrtemumes, source of electric current.

УДК 383.03 (07)

Григорчук О. М.

Київський коледж будівництва, архітектури та дизайну

### ВПЛИВ СТРУКТУРИ НАВЧАЛЬНИХ ФІЗИЧНИХ ЗАДАЧ НА ПІДГОТОВКУ МАЙБУТНІХ БУДІВЕЛЬНИКІВ

*У статті розглянуті деякі аспекти структури навчальних фізичних задач будівельної тематики. Зокрема, проаналізовані морфологічні засоби стилістики тексту навчальної задачі з фізики, розроблені методичні рекомендації постановки (складання) текстових навчальних задач з фізики зазначеного типу.*

**Ключові слова:** навчальна задача, структура задачі, підготовка фахівця будівельної галузі.

Вчені-педагоги поняттю “задача” дають свої дефініції, тому що єдиного визначення поняття задачі немає ні в психологічній, ні в педагогічній літературі. Педагог Т. А. Ільїна вважає, що задача – це словесне формулювання проблеми, прийнятої до розв’язання [5].

“Задача – це необхідність свідомого пошуку відповідного засобу для досягнення певної мети” – так сформулював сутність поняття “задача” у своїй книзі “Математичне відкриття” відомий американський педагог-математик Д. Пойа [10].

І. І. Ільясов вважає, що “будь-яка задача – це вимога або знайти якісь знання про явища дійсності (об’єкти і процеси) і характеристики, які ці явища мають у певних, заданих у задачі, умовах, або отримати якийсь практичний результат (побудувати щось, забезпечити виконання якихось умов тощо)” [6].

О. М. Леонтєв визначає поняття “задача” – як “ціль, задану у певних умовах” [8, с. 266].

З’ясовуючи сутність фізичних задач Л. М. Фрідман визначає задачу як словесно-символічний опис реальної або уявної ситуації з відшукування невідомих характеристик розглядуваного явища (процесу) [16, с. 24] і підкреслює, що довільні задачі, в тому числі і навчальні, “виникають з яких-небудь реальних проблемних ситуацій”. Тому пропонує розглядати задачі “як знакові моделі проблемних ситуацій” [15, с. 5-6]. Отже, для розуміння сутності задачі необхідно розкрити її структуру.

У “Філософській енциклопедії” під структурою розуміють “відносно стійку єдність елементів, їх взаємозв’язків і цілісності об’єкту, інваріантний аспект системи” [13]. “Філософський словник” розглядає структуру, як “будову і внутрішню форму організації системи, що виступає як єдність стійких взаємозв’язків між її елементами, а також законів цих взаємозв’язків” [14]. Отже, найважливішою характеристикою структури є цілісність та єдність стійких взаємозв’язків.

Розглядаючи структуру задачі як систему, Ю. М. Кулюткін [7] виділяє два компоненти:

– умову, задану сукупністю об’єктів, що знаходяться між собою в певних