

УДК 656.252:656.212.5

*В.Ю. Шигін,  
канд. техн. наук О.В. Нейчев*

## **РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛАМПИ РОЗЖАРЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ КЕРУВАННЯ СТАНЦІЙНИМИ СВІТЛОФОРАМИ**

*Представив д-р техн. наук, професор В.І. Мойсеєнко*

**Вступ.** Найбільш перспективним пристроєм узгодження мікропроцесорних систем залізничної автоматики (СЗА) з об'єктами керування (ОК) (обмотки реле, двигуни стрілочних електроприводів, сигнали світлофорів, рейкові кола) є трансформаторний, оскільки має мінімум елементів, дозволяє реалізувати схему "2 з 2", забезпечує контроль справності каналу керування за рахунок його динамічної роботи, а також забезпечує гальванічну ізоляцію між ОК та мікропроцесорними пристроями. І хоча апаратура СЗА з використанням трансформаторного пристрою узгодження (ТПУ) вже достатньо поширена, безконтактне керування саме напільним обладнанням потребує детального вивчення через необхідність врахування ряду параметрів ОК, забезпечення оптимального режиму керування та достовірного контролю їх стану.

**Постановка проблеми.** Такі складові схеми ТПУ керування вогнем світлофора, як кабельна лінія, сигнальний

трансформатор, лампа розжарювання та необхідність у забезпеченні денного та нічного режимів горіння, контролю цілісності нитки лампи в "гарячому", а також перспективність контролю в "холодному" стані утворюють сукупність факторів, що безпосередньо впливають на безпечність, надійність і відмовостійкість пристроїв керування світлофорами. Ключовим елементом схеми при цьому є лампа розжарювання, врахування електричних характеристик у часі якої являє собою достатньо складне завдання, що може бути вирішене з використанням сучасних програмних продуктів (ПП) дослідницького призначення. Вони забезпечують можливість моделювання та комплексного аналізу існуючих і розроблених схем, але за умов наявності математичних моделей, які дозволяють підвищити точність результатів і забезпечити адекватність.

**Аналіз досліджень та публікацій.** На підставі тверджень у роботі [1] правомірно буде зазначити, що використання ТПУ в

мікропроцесорних СЗА є доцільним завдяки його якісним і кількісним показникам надійності та безпечності. Проте використання схеми з ТПУ для керування сигналами станційних світлофорів потребує її аналізу в комплексі з об'єктом керування – лампою розжарювання та врахуванням її електричних характеристик у часі. Електричні характеристики ламп розжарювання тісно пов'язані зі світло-теплотехнічними їх характеристиками. Даний взаємозв'язок наведено в роботах [5, 7]. Моделювання електричних моделей схем і приладів можливо здійснити в ПП MATLAB та пакеті Simulink [2].

**Мета статті.** Безконтактне керування сигналами станційних світлофорів має значну кількість переваг порівняно з релейно-контактними схемами. Проте наявність у колі керування ключових напівпровідникових елементів, їх динамічна робота, наявність кабельної лінії, що може піддаватись впливу інших джерел і завод, інерційність вольт-амперної характеристики використовуваних у світлофорах ламп розжарювання утворюють передумови для нестабільної роботи схем керування сигналами світлофорів на станціях. Розроблення математичної та програмної моделі лампи розжарювання з використанням ПП MATLAB та пакета Simulink є головною метою статті, оскільки дозволить у

подальшому підвищити адекватність розроблених моделей і більш детально дослідити схеми керування сигналами світлофорів на базі ТПУ.

**Модель схеми керування сигналом світлофора.** У найпростішому випадку ТПУ реалізується з використанням транзистора VT1, трансформатора TV1, діода VD1, конденсатора C1 та навантаження постійного струму (реле) (рис. 1, а). У роботі [1] дана схема класифікується як однофазний декодер логічних змінних і вважається безпечною завдяки виключним властивостям трансформатора до селективності за родом струму. У схемі рис. 1, б збережений принцип ТПУ, але використано два напів-мости на транзисторах VT1, VT2 та VT3, VT4 для формування різнополярних імпульсів і підвищення ККД схеми. Для керування затворами транзисторів використовуються спеціалізовані мікросхеми – драйвери (DD1, DD2), що забезпечують формування захисної затримки (Death time) між включеннями транзисторів та іншу додаткову оптимізацію їх роботи. На входи u1.1 та u2.1 драйверів подається імпульсна послідовність від мікроконтролера для керування транзисторами, а входи u1.2 та u2.2 використовуються для формування необхідного коефіцієнта заповнення імпульсів [3].

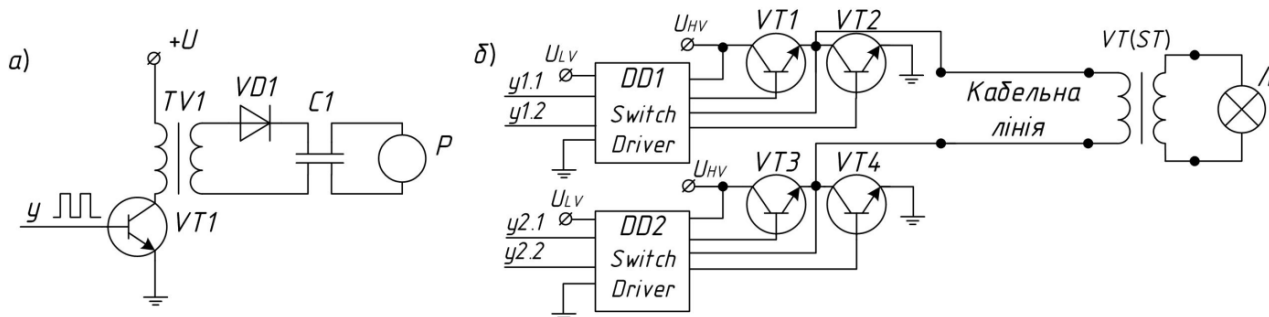


Рис. 1. Схеми ТПУ для керування реле (а) і сигналом (б)

Для прикладу побудовано програмну модель схеми з ТПУ. В якості силових ключових елементів використано модель Mosfet уніполярних транзисторів з ізольованим затвором (VT1 – VT4). Параметри моделі задані у відповідності з технічною документацією на уніполярний транзистор STP10N65K3. У якості моделі сигнального трансформатора використано модель однофазного трансформатора Linear Transformer. Параметри її задано близькими до параметрів трансформатора СТ-4. Для врахування наявності пульсацій живлячої напруги живлення вихідного каскаду інвертора каналу складається з джерела трифазної напруги Three-Phase Voltage Source ( $U = 235 \text{ V}$ ) і трифазного діодного випрямляючого моста Universal Bridge. Модель кабельної лінії збудовано з дискретних елементів – опору та ємності, що імітують кілометричний опір і кілометричну міжжильну ємність кабелю марки СБЗПУ згідно з рекомендаціями у роботі [4]. Опір жили кабелю –  $29 \text{ Ом} \times \text{км}$ , міжжильна ємність для найгірших умов –

$0,3 \text{ мкФ} \times \text{км}$ . Опір ізоляції між жилами  $R_{i1} = 25 \text{ МОм}$ .

Керування роботою транзисторів передбачається від одного мікроконтролера, при цьому мікроконтролер другого каналу здійснює подачу живлення для схеми керування затворами транзисторів. Таким чином реалізується схема "2 з 2". У моделі каналу керування даний аспект не впливає на характеристики каналу, тому опущений. При цьому керування затворами транзисторів здійснюється від віртуальних блоків Pulse Generator, що формують логічну послідовність імпульсів з частотою  $400 \text{ Гц}$  і коефіцієнтом заповнення імпульсів  $40 \%$ .

Загальна модель каналу керування наведена на рис. 2. Головною складовою схеми є лампа розжарювання (Lamp). Її параметри в часі, зумовлені нелінійністю ВАХ, можуть створювати труднощі при оцінці її стану під час роботи. Для моделювання лампи розжарювання з характеристиками, наближеними до реальних, необхідно побудувати її Simulink-модель.

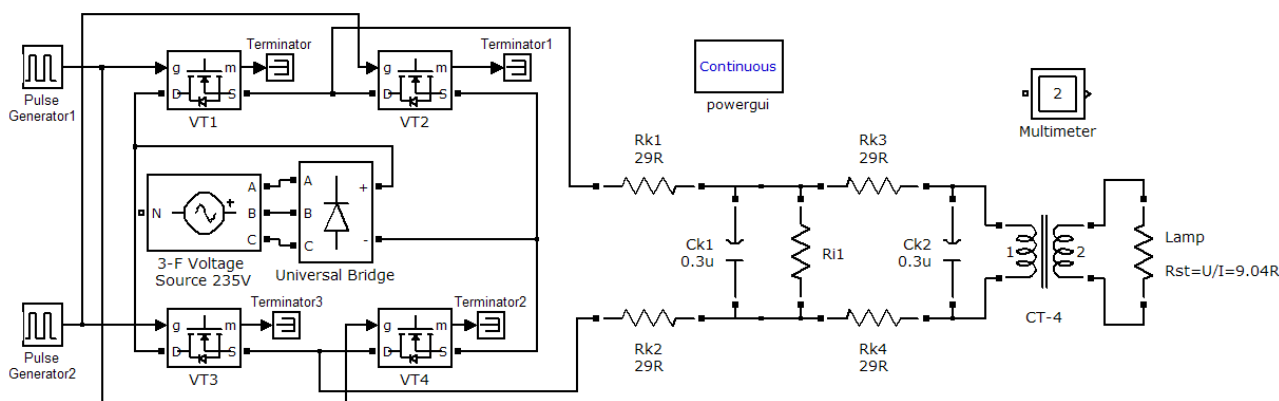


Рис. 2. Програмна Simulink-модель схеми з моделлю лампи в стаціонарному режимі

Модель лампи розжарювання. Лампа розжарювання являє собою нелінійний інерційний опір, а її вольт-амперна характеристика певною мірою залежить від теплових процесів у ній. Стала часу  $\tau$  розігріву тіла розжарювання (ТР) залежить

від ряду факторів, але відомо, що у випадку живлення лампи змінним струмом з періодом, значно меншим за сталу часу розігріву  $T \ll \tau$ , у стаціонарному режимі лампа матиме лінійну ВАХ [5].

Експериментально встановлено, що лампи ЖС12-15 та ЖЛ312-15-15 мають опір тіла розжарювання  $R_0 = 0,8...1,2$  Ом при температурі  $T_0 = -18...+50$  °С (255...323 К). При температурі 300 К ТР має опір 1 Ом. Відомо, що максимальна температура тіла розжарювання  $T_{СТ}$  в стаціонарному режимі при номінальній напрузі та колірній температурі 2854 К складає 2800 К [6, 7]. Зміну опору залежно від температури характеризує

температурний коефіцієнт опору  $\alpha$ , який для вольфраму складає 0,0045 1/К:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \Delta T). \quad (1)$$

Зміна опору в часі призводить до підвищення втрат потужності  $\left(\frac{dI^2 R}{dt}\right)$  і розігріву ТР. Тоді кількість виділеного тепла

$$dQ = \frac{U^2}{R_0(1 + \alpha \Delta T)} dt, \quad (2)$$

де  $dQ$  – кількість тепла, що виділилась за час  $t$ , Дж;

$U$  – номінальна напруга на затискачах, В ( $U = 11,3$  В).

З роботи [8] відомо, що тепло, яке виділяється QВИД тілом, поглинається QНАГР ним же та сприяє подальшому

розігріву, а також випромінюється QВИП в навколишнє середовище:

$$dQ_{\text{ВИД}} = dQ_{\text{НАГР}} + dQ_{\text{ВИП}}. \quad (3)$$

Для випадку ТР, що розглядається відповідно до виразу (3) справедливий вираз

$$\frac{U^2}{R_0(1 + \alpha \Delta T)} dt = cm dT + \varepsilon \sigma S T^4 dt, \quad (4)$$

де  $c$  – питома теплоємність вольфраму (154 Дж/кг×К);

$m$  – маса ТР (розраховано за фізичними та геометричними параметрами ТР –  $1,215 \times 10^{-5}$  кг);

$\sigma$  – стала Стефана-Больцмана ( $5,6704 \times 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>);

$\varepsilon$  – ступінь чорноти (для вольфрамової нитки  $\varepsilon = 0,03..0,33$  при  $T = 200...2800$  К, визначена експериментально [7]);

$S$  – площа поверхні випромінювання (розраховано за геометричними параметрами ТР –  $25,12 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>).

Якщо розглядати вираз (4) для початкового моменту часу, коли  $t = 0$ , а  $T = T_0 = 300$  К, тобто температура ТР дорівнює температурі навколишнього

середовища і випромінювання відсутнє, то вираз (4) матиме такий вигляд:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{U^2}{R_0 cm} \Rightarrow \frac{U^2}{R_0 cm} \Big|_{t_0=0}.$$

При цьому струм через ТР буде максимальним:

$$I_0 = \frac{U}{R_0} = \frac{11,3}{1} = 11,3 \text{ А.}$$

При досягненні ТР стаціонарного режиму потужність випромінювання дорівнюватиме номінальній потужності лампи, тобто

$$\frac{dT}{dt} = \frac{U^2}{cmR_0(1+\alpha(T_{CT} - T_0))} - \frac{\varepsilon\sigma S(T_{CT} - T_0)^4}{cm}$$

Методом підстановки встановлено, що баланс потужностей досягається при температурі ТР (для ламп 15 Вт) близькій до  $T_{CT} = 2550$  К.

Тоді час розігріву від  $T_0$  до  $T$  можна визначити з виразу

$$dt = \frac{cm}{\frac{U^2}{R_0(1+\alpha\Delta T)} - \varepsilon\sigma S T^4} dT; \quad (5)$$

При переході до стаціонарного режиму, коли споживана потужність повністю витрачається на випромінювання, а втрати на розігрів відсутні [7], приріст температури у виразі (4) прагне до нуля 0.

Для визначення залежності струму через ТР на початковій нелінійній частині

ВАХ, коли  $\varepsilon\sigma S T^4 \ll \frac{U^2}{R_0(1+\alpha\Delta T)}$ , втратами на випромінювання можна знехтувати. Тоді розрахунковий вираз для сталої часу матиме вигляд

$$dt = \frac{cmR_0(1+\alpha\Delta T)}{U^2} dT; \quad (6)$$

Після інтегрування по  $dT$  вираз (6) набуде такого вигляду:

$$\tau = \frac{cmR_0(T_V + \alpha \frac{T_V^2}{2} - \alpha T_0 T_V)}{U^2}, \quad (7)$$

де  $T_V$  – температура нагріву ТР, К.

Вираз (7) є математичною моделлю лампи розжарювання у початковий момент

після комутації кола з нею. Час переходу до стаціонарного режиму за умови наявності номінальної напруги на ТР складає

$$\tau = \frac{154 \times 1,215 \times 10^{-5} \times 1 \times (2550 + 0,0045 \frac{2550^2}{2} - 0,0045 \times 300 \times 2550)}{11,3^2} = 0,189 \text{ с.}$$

За виразом (7) визначено час розігріву для кожного значення температури за умови номінальної напруги на ТР (рис. 3) і

встановлено значення струму через ТР для кожного моменту часу (рис. 4).

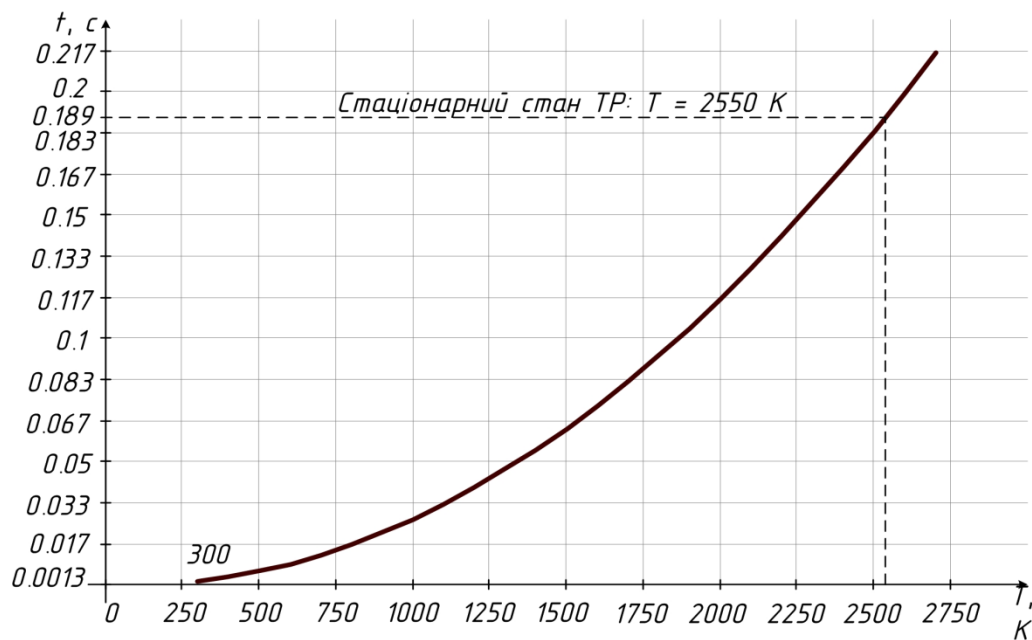


Рис. 3. Залежність часу нагріву від температури нагріву ТР

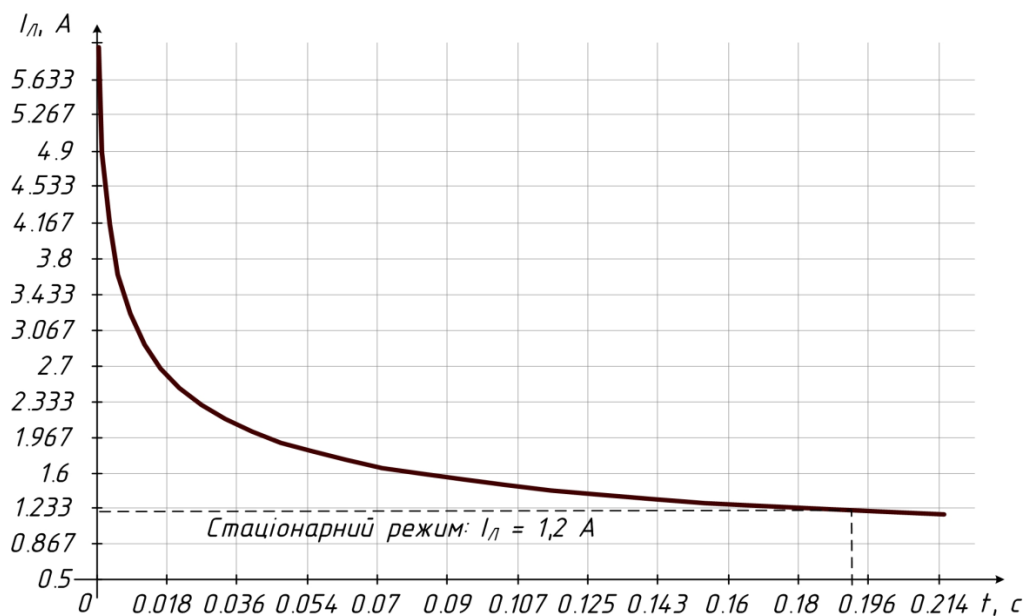


Рис. 4. Перехідний процес у ТР – залежність струму від часу

Зміна температури в часі зумовлює зміни опору ТР через тепловий рух атомів кристалічної решітки вольфраму. Це

зумовлює зміну струму ІЛ через ТР, яку можна ілюструвати таким виразом:

$$dI_{л} = \frac{U_H}{R_0(T)} dt \quad (8)$$

Розрахункова залежність струму, від зміни в часі температури, а отже, і опору TP наведена на рис. 4.

На основі табличних даних залежності опору TP від температури

побудовано Simulink-модель лампи розжарювання, яка враховує дану залежність (рис. 5).

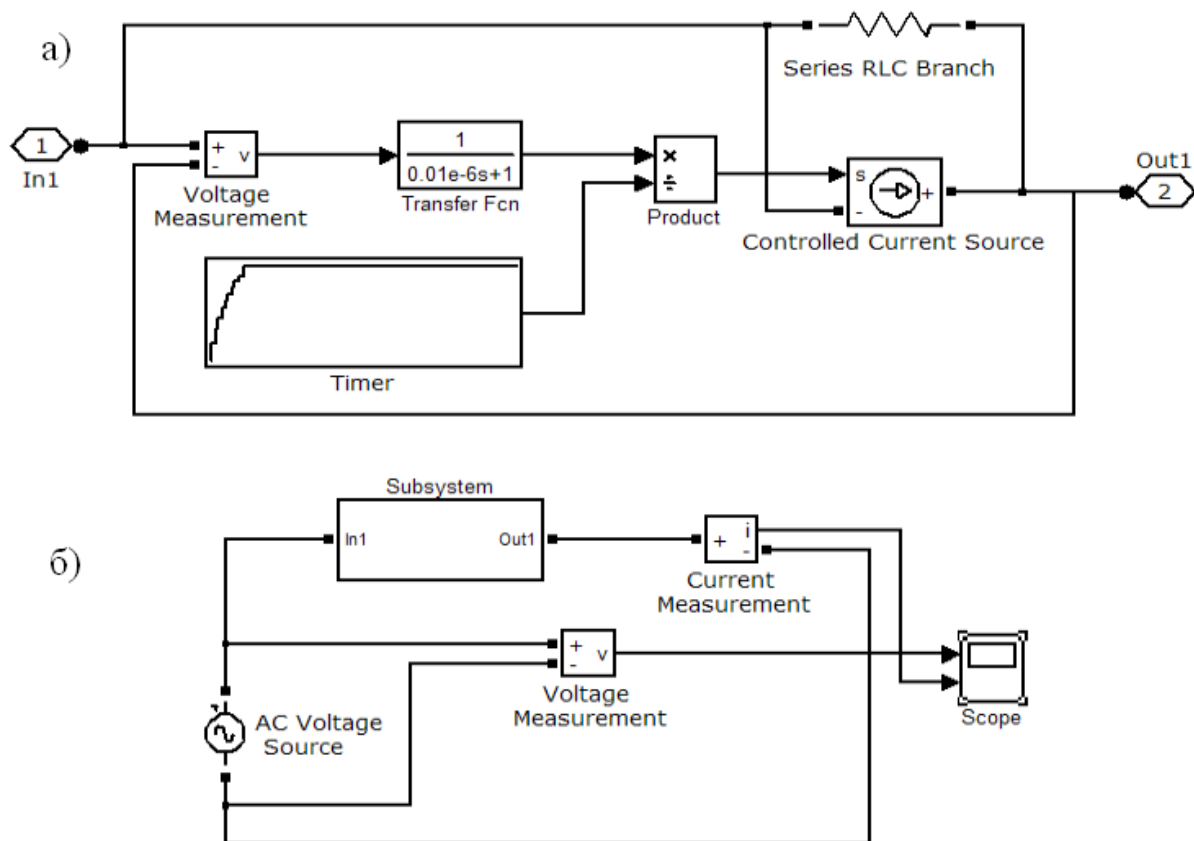


Рис. 5. Програмна модель лампи розжарювання (а) та схема її вимірювання (б)

Сигнали напруги та струму, вимірні при підключенні моделі до ідеального джерела змінної напруги з амплітудним значенням 12 В, наведено на рис. 6.

Рис. 6 наочно ілюструє характер залежності сили струму через TP лампи 15 В при номінальній напрузі на її затискачах. Завищений струм через ламу спостерігається впродовж до 60 періодів частоти сигнального струму, що слід враховувати при реалізації режиму контролю цілісності нитки лампи в "холодному" та "гарячому" станах. Так, експериментально встановлено, що темно-

червоне світло від нитки розжарювання, яке не пройде через світлофільтр сигналу через особливості їх виготовлення, спостерігається при температурі TP близько 800 К [7], що згідно з отриманими розрахунковими даними відповідає часу 0,017 с, що відповідає семи періодам сигнального струму частотою 400 Гц. При цьому, якщо період контролю цілісності нитки в "холодному" стані не викликати розігрів TP до температури у 900 К, випаровування вольфраму буде відсутнє, і такий режим не впливатиме на строк експлуатації лампи.

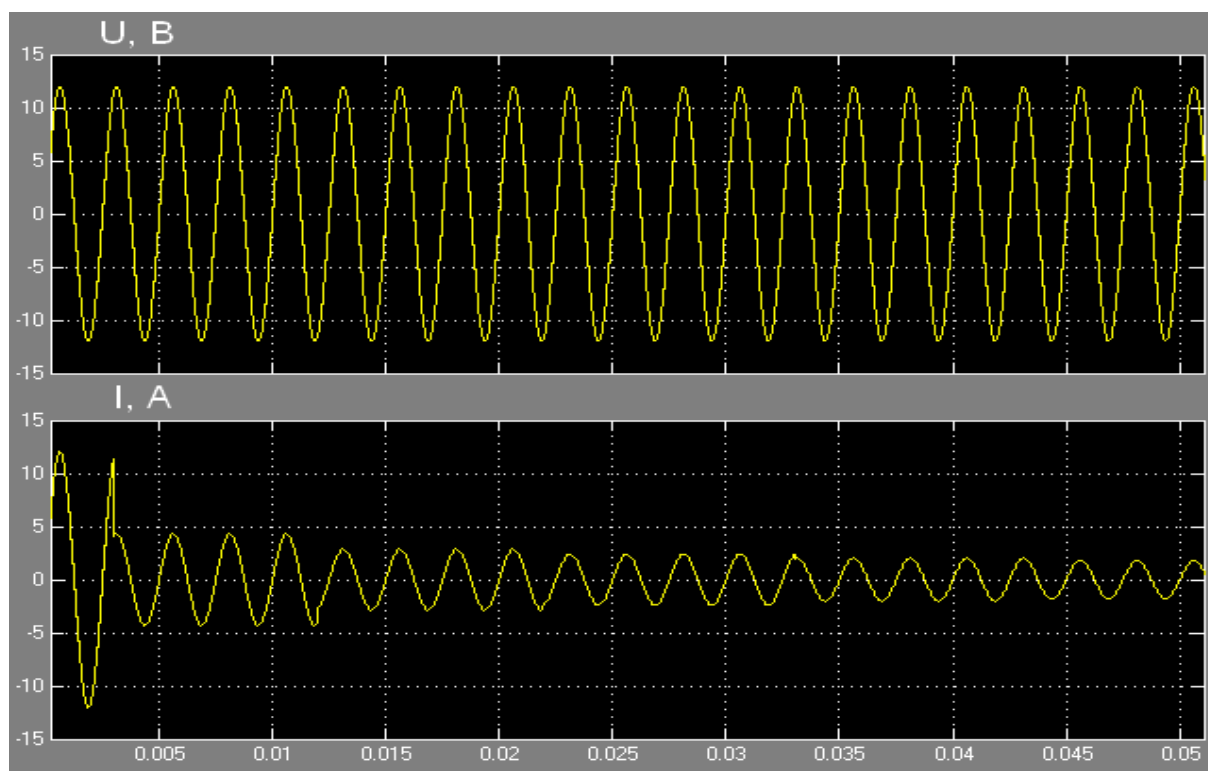


Рис. 6. Результати вимірів моделі лампи розжарювання

**Висновки.** Використання пристроїв СЗА для керування світлофорами з ТПУ на базі сигнального трансформатора вже має місце на залізничному транспорті [9, 10]. Проте тема безконтактного керування сигналами світлофора є дуже актуальною під час широкого впровадження мікропроцесорних СЗА. У даній роботі розроблено модель схеми з ТПУ каналу керування сигналом для реалізації подальших досліджень і модель лампи

розжарювання, яка враховує перехідні процеси в ній. Визначено оптимальний період контролю цілісності нитки в "холодному" стані. Проте отримані результати дослідження не можуть бути остаточними – необхідне моделювання каналу керування комплексно з елементами контролю та подальше визначення оптимальних інтервалів між періодами контролю для виключення імовірності підсвічування сигналу.

### Список літератури

1. Сапожников, В.В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики [Текст] / В.В Сапожников, Вл.В. Сапожников, Х.А. Христов, Д.В. Гавзов, под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; Спб.: Питер, 2008. – 288 с.
3. Гейтенко, Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет [Текст]: учеб. пособие / Е.Н. Гейтенко. – М.: С.-ПРЕСС, 2008. – 448 с.



4. Пусвацет, Ю.Ю. Светодиодные светооптические системы для удаленных светофоров [Текст] / Ю.Ю. Пусвацет, Н.Ю. Широков // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 1. – С. 24-28.
5. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л.А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
6. Котляренко, Н.Ф. Путевая блокировка и авторегулировка [Текст]: учеб. для вузов / Н.Ф. Котляренко, А.В. Шишляков, Ю.В. Соболев и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
7. Гуторов, М.М. Основы светотехники и источники света [Текст]: учеб. пособие для вузов / М.М. Гуторов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
8. Трестман, Е.Е. Автоматизация контроля буксовых узлов в поездах [Текст] / Е.Е. Трестман, С.Н. Лозинский, В.Л. Образцов. – М.: Транспорт, 1983. – 352 с.
9. Никитин, А.Б. Обобщение тенденций развития устройств электрической централизации и опыта тиражирования компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях [Текст] / А.Б. Никитин, С.В. Бушуев // Транспорт Урала. – 2007. – № 2. – С. 2-8.
10. Кустов, В.Ф. Микропроцессорная система электрической централизации стрелок и сигналов без релейной аппаратуры и рельсовых цепей [Текст] / В.Ф. Кустов // Вестник Metallurgtransa и Союзгрузпромtransa. – 2009. – № 4. – С. 36-45.

**Ключові слова:** трансформаторний пристрій узгодження, безконтактне керування, сигнал світлофора, ключові елементи, лампа розжарювання, Simukink-модель, перехідні процеси, стаціонарний режим.

#### *Анотації*

Наведено стислий опис принципу реалізації схем з трансформаторним пристроєм узгодження для керування сигналами станційних світлофорів. Розроблено математичну модель лампи розжарювання 15 Вт, яка враховує інерційність і нелінійність її вольт-амперної характеристики. Запропоновано програмну модель каналу безконтактного керування сигналом світлофора та програмну модель лампи розжарювання, які можуть бути використані в подальших дослідженнях.

Приведено краткое описание принципа реализации схем с трансформаторным устройством согласования для управления сигналами станционных светофоров. Разработана математическая модель лампы накаливания 15 Вт, которая учитывает инерционность и нелинейность ее вольт-амперной характеристики. Предложена программная модель канала бесконтактного управления сигналом светофора и программная модель лампы накаливания, которые могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

The short description of a principle of implementation of circuit designs with the transformer arrangement of the matching for control of signals of station traffic-lights is resulted. The mathematical model of an incandescent lamp of 15 W which considers time delay and non-linearity of its voltage-current characteristic is developed. The program model of the channel of a noncontacting control by a signal of the traffic-light and program model of an incandescent lamp which can be used in further probing is offered.