

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Данчук Дмитро Миколайович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Моделювання дугового генератора коротких замикань в низьковольтних
(тема роботи)
мережах 0,4кВ в навчальних цілях

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Данчук Д. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Гончаренко Юрій Павлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Данчук Д. М. Моделювання дугового генератора коротких замикань в низьковольтних мережах 0,4кВ в навчальних цілях. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Робота присвячена проблемі обґрунтування динамічної фізико-математичної моделі процесів, рішення системи рівнянь якої дозволило б імітувати стадію виникнення та протікання електричної дуги при коротких замиканнях від моменту виникнення до моменту плавлення провідників (контактів).

Ключові слова: короткі замикання, електрична дуга, математична модель, вольт-амперна характеристика.

ABSTRACT

Danshuk D. M. Design of arc generator of short circuits in the low-voltage networks of 0,4 kV in educational aims. Qualifying work on the receipt of educational master's degree after speciality 141 is Electroenergy, electrical engineering and electromechanics is the Polesye national university, Zhytomyr, 2020. The robot of присвячена of проблемі ground of dynamic фізико-математичної model of processes, decision of the system of equalizations of that would allow to imitate the stage of origin and flowing of voltaic arc at short circuits from a moment an origin to the moment of melting of explorers (contacts).
Keywords: short circuits, voltaic arc, mathematical model, volt-ampere description.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ	7
1.1. Аналіз моделей описання процесів електричної дуги	7
1.2. Обґрунтування математичної моделі імітатора електричної дуги.	9
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ДУГОВОГО ГЕНЕРАТОРА КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ	17
2.1. Моделі дуги Майра та Кассі	18
2.2. Модель дугового генератора в LabVIEW	24
2.2.1. Аналіз програмного забезпечення для графічного програмування LabVIEW.	24
2.2.2. Переваги та недоліки програмного забезпечення LabVIEW	27
2.2.3. Складання та спрощення схеми дугового генератора в LabVIEW	28
2.3. Проведення моделювання та розрахунку параметрів, що досліджувались	34
Висновки по розділу 2	37
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	42

ВСТУП

Сьогодні, в цілях успішної підготовки спеціалістів в області енергетики, в навчальних закладах встає питання ефективного використання нових прикладних програмних пакетів для моделювання різних фізичних процесів які відбуваються в електричних мережах на тому, чи іншому етапі їх використання.

Одним із основних напрямків являється підготовка спеціалістів в області релейного захисту та автоматики енергетичних систем. Для цього необхідно вдосконалювати лабораторну навчальну базу для вивчення процесів виникнення електричної дуги при коротких замиканнях (КЗ).

Особливо актуальним являється моделювання електричної дуги при коротких замиканнях в закритих чарунках комплектних розподільчих пристроях на напругу 0,4 кВ, де дуга може перекинутись на збірні шини і тим самим привести до значних пошкоджень та відключенню великого числа споживачів електроенергії. Виходячи із вище сказаного, можна визначити важливий напрямок в розробці моделі електричної дуги для аналізу процесів, які відбуваються при КЗ для рішення задач побудови швидкодіючих засобів мереж з контролюванням їх параметрів, наприклад дугових захистів, а також для врахування їх впливу на функціонування основних та резервних захистів високовольтного обладнання.

Вирішування даних завдань спонукає до виконання кількох етапів робіт:

- 1) Аналіз відомих математичних моделей електричної дуги, та вибір такої, яка найбільш повно описує фізичні процеси які виникають в електричній дузі при КЗ.

- 2) Розробка та обґрунтування блок схеми функціонального перетворювача, яка дозволила б моделювати процес електричної дуги.

- 3) На базі вибраних моделей та імітатора електричної дуги побудувати лабораторну установку для вивчення процесів та побудови вольт-

амперних характеристик струму та напруги при виникненні КЗ в різних точках мережі.

Слід відмітити, що при розгляді процесу виникнення та протікання електричної дуги при КЗ в електричних мережах доцільно використовувати динамічні моделі електричної дуги яка виникає в процесі зварювання, так як фізичні процеси їх виникнення та протікання аналогічні[1, 2].

Ціллю даної роботи являється обґрунтування динамічної фізико-математичної моделі процесів, рішення системи рівнянь якої дозволило б імітувати стадію виникнення та протікання електричної дуги при КЗ від моменту виникнення до моменту плавлення провідників (контактів).

Об'єкт дослідження: електрична дуга при коротких замиканнях в системах електропостачання.

Методи дослідження: визначення математичної моделі електричної дуги для створення лабораторного стенду моделювання коротких замикань в електричній мережі.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Гончаренко Ю.П., Данчук Д.М. ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ІМІТАТОРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ.

IV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 2. С. . «Біоенергетичні системи». 29 травня 2020 Житомир, Україна.

2. Гончаренко Ю.П., Загородній Д.О., Данчук Д.М. АНАЛІЗ МОДЕЛІ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

IV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ МАТЕРІАЛИ. ЧАСТИНА 2. С. 70-74. «Біоенергетичні системи». 29 травня 2020 Житомир, Україна.

3. Данчук Д.М. АКТУАЛЬНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ В ЗАКРИТИХ ЧАРУНКАХ КОМПЛЕКТНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2020». 26 жовтня 2020 р. Житомир: Поліський національний університет, 2020.- 400 с.

РОЗДІЛ 1

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ

1.1. Аналіз моделей описання процесів електричної дуги

В даний час великого поширення набули зварювальні та споріднені процеси і технології, в яких використовується зварювальна і плазмова дуга, яка відображається певними формулами. Це зварювання, різання, наплавлення, напилення, плавка і переплавка металів і т.д.

Для створення і випробування нових малогабаритних і ефективних джерел напруги (струму) для сучасних електротехнологій, які мають підвищені динамічні характеристики, потрібні дослідження динамічних властивостей цих джерел при роботі на нелінійні навантаження – електричну дугу. У цьому є важливим розробка моделі дуги для використання при вирішенні різних прикладних задач. Очевидно, що для досягнення поставленої мети необхідно вирішити декілька самостійних завдань.

Перше завдання – це вибір найбільш прийнятною математичної моделі для опису процесів зварювальної дуги. Друге завдання – побудова функціонального перетворювача, що дозволяє вирішити рівняння математичної моделі динамічної дуги. І, нарешті, третє завдання полягає в отриманні функціональної залежності для напруги дуги від струму.

Наведемо основні аргументи, що пояснюють чому узагальнена модель зварювальної дуги в MATLAB/Simulink виявилася настільки ефективною для вирішення цілої сукупності завдань.

При моделюванні процесу зварювання широкого поширення одержали динамічні моделі дуги. В даних моделях зварювальна дуга представлена як нелінійний елемент електричного кола. До таких моделей відносяться моделі: Кассі, Майра, Заруді, Шельгазе, Siemens/Habedank, Kema, Schavemaker, Schwarz (Avdonin), математична модель динамічної дуги (ММДД), розроблена в ІЕЗ ім. Є. О. Патона, т.ін. [1,3, 4].

ММДД являється найбільш загальною моделлю на базі енергетичних параметрів електричної дуги, а тому може бути використана для побудови будь-яких видів статичних вольт-амперних характеристик (СВАХ) дуги, дозволяє вирішувати завдання на основі електротехнічних термінів, і крім того, може бути поширена на широкий спектр електричних дуг зі змінною довжиною зварювального стовпа. За допомогою ММДД визначаються основні енергетичні параметри стовпа дуги до яких відносяться відведена потужність і внутрішня енергія стовпа дуги.

Слід відмітити, що коли СВАХ має степеневий вид з показником ступеня n , модель, наприклад, Кассі виходить з ММДД при $n=0$, модель Майра має місце при $n=-1$, а модель Заруді реалізується при $n=-(1-k)/(1+k)$, де k – показник не лінійності плазми.

До конкретних прикладів програм комп'ютерного моделювання схем з дугами можна віднести, в першу чергу, пакети ЕМТР96 (v3.0), ХТранс. Перший з них базується на основі методу вузлових потенціалів і має вбудовану функцію постійного кроку. Модель даного пакету не доведена повністю до практичного використання, і тому область його раціонального застосування не визначена.

Відзначимо, що модель дуги в ЕМТР96 активна тільки в короткий час безпосередньо при переході струму через точку нуль, і це може призводити до невірних результатів. Пакет ХTrans, що отримав більш широке поширення, базується на диференціальних алгебраїчних рівняннях, реалізує модель дуги Майра і має вбудовану функцію змінного кроку. Останнє є великою перевагою при дослідженнях схем з нелінійними моделями дуги.

При побудові моделей складних електротехнічних систем з використанням методів імітаційного та функціонального моделювання перевага належить прикладним пакетам MATLAB/Simulink. Ці пакети, на відміну від пакетів схемотехнічного моделювання типу OrCAD, PSpice, DesignLab, Workbench та ін., набагато спрощують модель, економиться

пам'ять, підвищується швидкість розрахунку і працездатність персонального комп'ютера (ПК).

Важливо відзначити, що пакет MATLAB Simulink/Arc Model Blockset базується на методі визначення стану в просторі, що став основною формою інтерпретації поведінки динамічних систем, і має функцію багаторазово змінного кроку. Для малої розмірності задач динаміки їх рішення має наочне геометричне відображення в межах декартової системи простору.

Зі сказаного випливає, що найбільш привабливим сучасним підходом до математичного моделювання електричної дуги та реалізації математичного опису з мінімальними складнощами пов'язані універсальні для моделювання пакета MATLAB/Simulink [15].

1.2. Обґрунтування математичної моделі імітатора електричної дуги

При моделюванні процесу зварювання необхідно мати на увазі, що в еквівалентній електричній схемі процесу протікання КЗ навантаженням являється електрична дуга.

Процеси які протікають в при даному процесі носять нелінійний характер.

Крім того ми знаємо, що найбільш загальна форма опису динаміки такого об'єкта на макрорівні – це диференціальні рівняння в простих похідних [5].

Далі електрична дуга як елемент електричного кола описується як тепловий інерційний макрооб'єкт [6,7] за формулами який можна охарактеризувати наступними параметрами: статичною вольт-амперною характеристикою (СВАХ) стовпа дуги $U_{cm.d}(i_\theta)$, відбиває статичні властивості дуги, і струмом стану дуги i_θ , що характеризує внутрішню енергію дуги на даний момент часу.

Параметри θ і i_θ пов'язані з струмом дуги i рівнянням математичної моделі динамічної дуги в диференціальній формі .

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} + i_{\theta}^2 = i^2, \quad (1.1)$$

де θ – постійна часу стовпа дуги; i – значення сили струму.

Постійна часу має велике значення для характеристики динамічного стану електричної дуги. Істотно, що зі збільшенням струму дуги і швидкості обдування постійна часу зменшується і для дуг в плазмотронах вона знаходиться в діапазоні $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ [7] .

При цьому напруга дуги:

$$u_{\text{д}} = \frac{U_{\text{ст.д}}(\theta)}{i_{\theta}} i + U_{\text{а-к}}, \quad (1.2)$$

де $U_{\text{а-к}}$ – сума приелектродних падінь напруги, яку в першому наближенні можна вважати величиною постійної; $U_{\text{ст.д}}(i_{\theta})$ – напруга на стовпі дуги в динаміці.

Через динамічні параметри стовпа дуги визначається потужність, що підводиться:

$$P = u_{\text{ст.д}} i = R_{\text{ст}}(i_{\theta}) i^2 = \frac{U_{\text{ст.д}}(\theta)}{i_{\theta}} i^2, \quad (1.3)$$

де $R_{\text{ст}}(i_{\theta}) = \frac{U_{\text{ст.д}}(i_{\theta})}{i_{\theta}} = u_{\text{ст.д}} / i$ – статичний опір стовпа дуги.

Відведена від стовпа дуги потужність однозначно визначається з відповідного статичного стану:

$$P_{\theta} = u_{\text{ст.д}}(i_{\theta}) i_{\theta}. \quad (1.4)$$

У разі статичної апроксимації нелінійної статичної вольт-амперної характеристики $i_\theta(u)$ математична форма апроксимованої ВАХ має вигляд [8]:

$$i_\theta(u) = I_0 \left(\frac{u}{U_0} \right)^{1/n}, \quad (1.5)$$

де I_0, U_0 – струм і напруга у фіксованій точці на ВАХ дуги (в обраній робочій точці);

n – показник ступеня ($n = \infty$ – для ВАХ незалежною від напруги; $n = 1/3$ – для вільно палаючих дуг; $n = -1$ – для дуг постійної потужності). У розрахунках використовувалося значення $n = -1/3$.

Із рівняння (1.5) видно, що ВАХ являється функцією двох величин, струму та напруги, які в свою чергу являються функціє нелінійного опору і рішенням даного рівняння є:

$$f(u, i) = 0, \quad (1.6)$$

Тобто можна визначити один параметр, який буде залежати від струму $R(i)$, що протікає по ньому, або від напруги $R(u)$ між його виводами.

Отже, вирішуючи рівняння відносно струму або напруги, приходять до залежного джерела струму $I_s(u)$ або напруги $U_s(i)$.

Для моделювання елементів з нелінійною вольт-амперною характеристикою використовується принципова модель на базі керованого джерела напруги або керованого джерела струму, наведена на рисунку 1.1 [8].

У моделі рисунок 1.1 до керованого джерела струму паралельно підключений вимірювач напруги. Між виходом вимірювача напруги і входом джерела струму (IT) включена Simulink-модель, що реалізує необхідну ВАХ

електричної дуги. Паралельно ІТ також підключений розв'язуючий резистор R_p .

Слід відзначити, що з технічної точки зору більш кращим є використання функціонального перетворювача першого типу, в якому напруга на стовпі дуги забезпечується за допомогою повторювача напруги. У цьому випадку досить просто імітувати напругу як на стовпі дуги, так і на приелектродних областях.



Рисунок – 1.1 Принципова модель нелінійного елемента (дуги)

Модель дуги представлена на блок-діаграмі рисунку 1.2. При створенні моделі в середовищі MATLAB використані відомі положення теорії і практики імітаційного моделювання [10], що описані формулами (1.5, 1.6).

На рисунку 1.3 в схемі представлені основні елементи:

- джерело сигналу постійної величини – Constant, яке складається з сигналів, отримуваних на виході блоку скалярного добутку двох векторів для отримання виразу і імітує напругу як на стовпі дуги так і на при електродних областях;

- Switch – це перемикач із сигналу датчика струму на постійний сигнал, який згідно [11] забезпечується ефективно і просте рішення проблеми фізичної реалізованості моделюючого елемента ;

- блок Memory – шляхом затримки на один крок дискретизації забезпечує усунення негативного впливу алгебраїчного контуру;

Модель самої дуги в Simulink реалізована за допомогою блоку Fcn.

ВАХ задана виразом:

$$U(i_\theta) = U_0 \left(\frac{i_\theta}{I_0}\right)^n. \quad (1.7)$$

Для довгих дуг, коли при електродними падіннями напруги можна знехтувати, рівняння динаміки дуги краще виражати в термінах провідності (в g -формі) і воно буде мати вигляд:

$$\left[\frac{2\theta}{1 - \frac{g}{G_{\text{дф}}(i_\theta)}} \right] \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} + 1 = \frac{i^2}{g^2 U_{\text{ст.д}}^2(i_\theta)} = \frac{i^2}{g P_\theta}, \quad (1.8)$$

де $G_{\text{ст.д}}(i_\theta) = (dU_{\text{ст.д}}(i_\theta)/di_\theta)^{-1}$ – диференціальна провідність;

$P_\theta = U_{\text{ст.д}}(i_\theta)i_\theta$ – відведена потужність;

$g = 1/R_{\text{ст}}(i_\theta) = i_\theta / U_{\text{ст.д}}(i_\theta)$ – статична провідність стовпа дуги.

В окремому випадку для статичної ВАХ степеневого вигляду (1.7) формула (1.8) записуються так :

$$\frac{2\theta}{1-n} \cdot \frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} + 1 = \left(\frac{I_0^n}{U_0}\right)^{\frac{2}{1-n}} \cdot \frac{i^2}{g^{2/(1-n)}} = \frac{u_{\text{д}} i}{P_\theta}. \quad (1.9)$$

Якщо, крім того, врахувати, що:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{i} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_{\text{д}}} \cdot \frac{du_{\text{д}}}{dt},$$

то рівняння (1.9) можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{i} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{u_{\text{д}}} \cdot \frac{du_{\text{д}}}{dt} = \left(\frac{u_{\text{д}} i}{P_\theta} - 1\right) \frac{1}{\tau}, \quad (1.10)$$

де $\tau = 2\theta / (1-n)$.

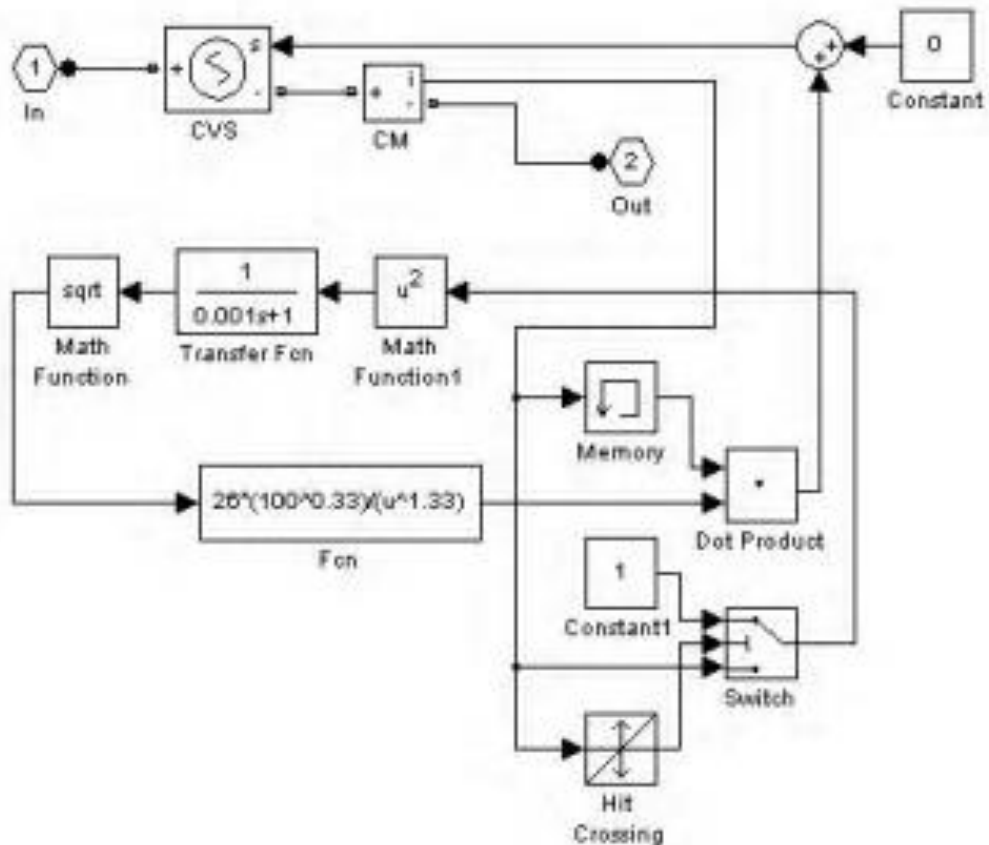


Рисунок 1.2. Блок-діаграма імітатора зварювальної дуги

Так як при синусоїдальному характері зміни струму його перехід через нуль відбувається практично лінійно [5] :

$$i = (di/dt)_0 t, \quad (1.11)$$

то після перетворень отримуємо:

$$\frac{1}{u_d^2} \frac{du_d}{d(t/\tau)} - \left(1 + \frac{\tau}{t}\right) \frac{1}{u_d} = -\frac{\tau}{P_0} \left(\frac{di}{dt}\right)_0 \frac{t}{\tau}. \quad (1.12)$$

Рівняння (1.12) є рівнянням Бернуллі. Якщо ввести нову змінну $z = 1/U_d$ і вибрати в якості масштабу часу постійну часу τ , то воно зводиться до лінійного.

Рішення цього рівняння має вигляд [8] :

$$z = \frac{e^{-t/\tau}}{t/\tau} \left[\frac{\tau(di/dt)_0}{P_\theta} \int (t/\tau)^2 e^{t/\tau} d(t/\tau) + C \right], \quad (1.13)$$

де C – стала величина.

Маючи на увазі, що для достатньо малих значень τ експоненційною компонентою (вільної складової реакції) можна знехтувати, отримуємо:

$$u_d = \frac{P_\theta}{\tau(d_i/d_t)_0} \cdot \frac{t/\tau}{(t/\tau)^2 - 2t/\tau + 2}. \quad (1.14)$$

Так як, другий доданок при малій постійній часу τ швидко згасає у порівнянні з періодом промислової частоти, а напруга дуги при $t=0$ дорівнює нулю.

З умови $u'_d(t_{\max}) = 0$ отримуємо рівняння для визначення t_{\max} :

$$t_{\max}^2 = 2t^2, \quad (1.15)$$

де $t_{\max} = \pm \sqrt{2\tau} = \pm 2\sqrt{2\tau}/(1-n)$.

При цьому:

$$\begin{aligned} u_{d \max 1} &= \frac{P_\theta}{\tau(d_i/d_t)_0} \cdot \frac{0.5}{(\sqrt{2}-1)} \cong \frac{1.21P_\theta}{\tau(d_i/d_t)_0}; \\ u_{d \max 2} &= \frac{P_\theta}{\tau(d_i/d_t)_0} \cdot \frac{0.5}{(\sqrt{2}+1)} \cong \frac{0.21P_\theta}{\tau(d_i/d_t)_0}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Як ми бачимо, напруга дуги зростає з підвищенням P_θ і в той же час чим менші значення θ , тим більше u_d . Слід зазначити, що максимальні значення u_d при синусоїдальному струмі відповідають СВХ дуги (при прагненні постійної часу θ до нуля).

Визначимо диференційний опір $R_{дф}$ з формул (1.14) і (1.11):

$$R_{\text{дф}} = \frac{P_{\theta}}{\tau^2 (d_i / d_i)_0^2} \cdot \frac{1}{(t/\tau) - 2\tau/\tau + 2}. \quad (1.17)$$

Відповідно величина

$$R_{\text{дф0}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\theta}}{\tau^2 (d_i / d_i)^2}. \quad (1.18)$$

Іншими словами, величина $R_{\text{дф}}$ при переході струму через нуль (для $t = 0$) дорівнює залишковому опору дуги $R_{\text{дф0}}$ [8].

Приклад проведеного розрахунку та побудови часових характеристик $u_{\text{д}} = u(t)$, $i = i(t)$, $R_{\text{дф}} = f(i)$ для значення параметрів $U_0=26$ В; $I_0=100$ А; $n= -1/3$ приведені в Додатку А.

Висновки до першого розділу

В даному розділі показано, що найбільш адекватною та оптимальною з точки зору синтезу систем автоматичного регулювання являється узагальнена математична модель динамічної дуги. Модель базується на представленні дуги як не лінійного опору в контурі «джерело живлення-дуга».

Результатом роботи являється модифікована математична модель динамічної дуги. Показаний підхід до синтезу нелінійних параметрів у вигляді поліному другого порядку.

Приведені прикладу розрахунку та побудови часових характеристик напруги, струму та диференціального опору дуги.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ДУГОВОГО ГЕНЕРАТОРА КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ

Дію електричної дуги при КЗ можна порівняти з роботою вимикача в електричній схемі (рис.2.1). Основна функція вимикача характеризується створення паралельного каналу протікання електричного струму зі змінним опором електричної дуги, який змінюється від провідника до ізолятора з виділенням деякого рівня напруги. Перед поточним вимиканням вимикача (через пошкодження) струм тече через канал дуги між контактами вимикача.

Через ненульовий опір каналу дуги, струм наводить напругу (ЕРС), перпендикулярну контактам вимикача – це напруга дуги. Дуга поводить як нелінійний опір.

Таким чином, обидві напруги дуги і струм дуги перетинають нульове значення в той же самий момент часу.

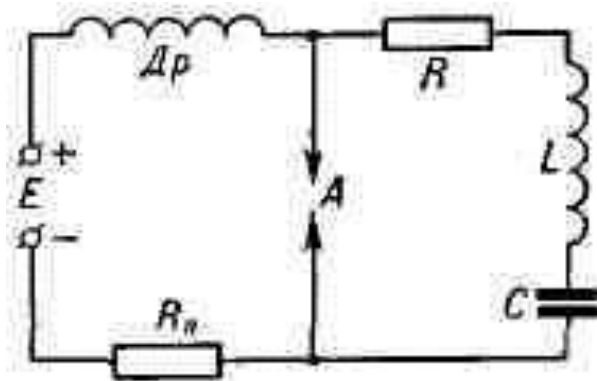


Рисунок 2.1 – Схема спрощеного дугового генератора

Якщо дуга охолоджена достатньо, то в момент проходження струму через нуль, вимикач може відключати ланцюг зі струмом, так як електрична провідність в каналі дуги є нульовою. Протягом поточного відключення опір дуги збільшується від фактично нульового до майже нескінченного за мікросекунди. Миттєво після поточного відключення, короткочасно відновлюється напруга, зростає (перпендикулярно контактам вимикача).

З прикладної точки зору використовуються моделі дуги типу "чорного ящика" які основані на моделюванні спрощеного рівняння з великою кількістю параметрів[11]. При такому підході присутній один недолік, який заключається в тому, що потрібно мати значний перелік параметрів для опису розряду дуги, який горить в конкретних умовах .

Цей тип моделей не моделює складні фізичні процеси у вимикачі, а описує електричний режим вимикача.

Виміряна напруга і поточні записи використовуються, щоб отримати параметри диференціальних рівнянь, що описують нелінійні опір електричної дуги для якогось певного вимірювання.

Найбільш вдалимими моделями даного типу, які описують підсистему дугового розряду являється модель Майра та модель Кассі[3,13].

2.1. Моделі дуги Майра та Кассі

При використанні адаптивних методів було прийнято, що опір (провідність) дуги являється адаптивною однозначною функцією її тепловмісту [14]. Такий підхід надає можливість істотно спростити початкові рівняння дугових процесів та одержати для динамічної ВАХ аналітичний вираз.

Як початок аналізу процесів, розглядається спільний вираз для опору стовпа дуги як функції тепловмісту Q та рівняння балансу енергії спрощеному вигляді[8,14]:

$$R_d = \frac{l}{\sigma S_d} = R_d(Q) ; \quad (2.1)$$

$$\frac{dQ}{dt} = ui - P, \quad (2.2)$$

де S_d – площа поперечного перетину дуги; $Q = h\gamma S_d l$ – тепловміст стовпа дуги; P – потужність відведена від стовпа дуги; h – питомий тепловміст.

Графіки, які показують характер зміни тепловмісту та провідності стовпа дуги показані на рис.2.2.

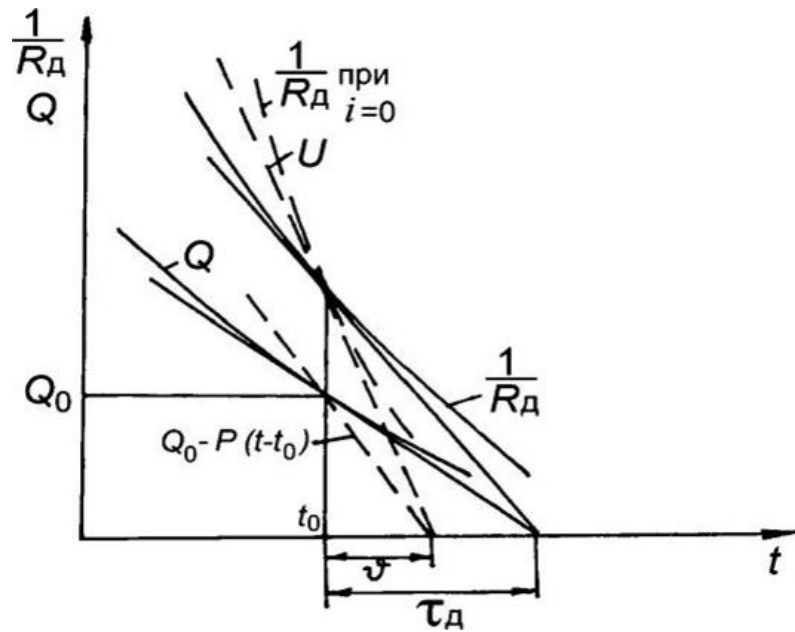


Рисунок 2.2– Залежність зміни тепловмісту та провідності від часу :

– - - - $U_l \neq 0$; – — — — $U_l = 0$.

Із рівняння (2.1) та (2.2) витікає рівняння, яке зв'язує електричні та теплові характеристики дуги:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) + \frac{d}{dt} \left(\ln \frac{h\gamma}{\sigma} \right) = \frac{1}{Q} (ui - P) \quad (2.3)$$

Враховуючи те, що $\ln(h\gamma/\sigma)$ майже не змінюється зі зміною температури і часу [8], то другим доданком можна знехтувати, а рівняння (2.3) набуде вигляду:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{g} (ui - P), \quad (2.4)$$

де $g = \frac{Q}{P}$.

В рамках моделі Майра приймається, що площа поперечного перетину стовпа дуги та відведена потужність незмінні в часі ($P=P_0$). Тоді для точки процесу $Q=Q_0$ рівняння (2.4) буде мати вигляд:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{g_m} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right), \quad (2.5)$$

$$\text{де } g_m = \frac{Q_0}{P_0} .$$

Блок моделі дуги Майра оформлений як напруга керованих джерел струму зображена на рис. 2.3.

В моделі дуги Кассі зроблене припущення, що температура стовпа дуги та його питомий електричний опір ρ являються незмінними в часі, а також відведена від стовпа потужність пропорційна об'єму дуги $P = P_{\text{пит}} S_d l$ ($P_{\text{пит}}$ – відведена потужність на одиницю об'єму стовпа дуги).

При таких допущеннях рівняння (2.4) буде мати вигляд:

$$R_d \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_d} \right) = \frac{1}{g_k} \left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1 \right) , \quad (2.6)$$

$$\text{де } E_0 = \sqrt{\rho P_{\text{пит}}} \text{ та } g_k = \frac{h\gamma}{P_{\text{пит}}} .$$

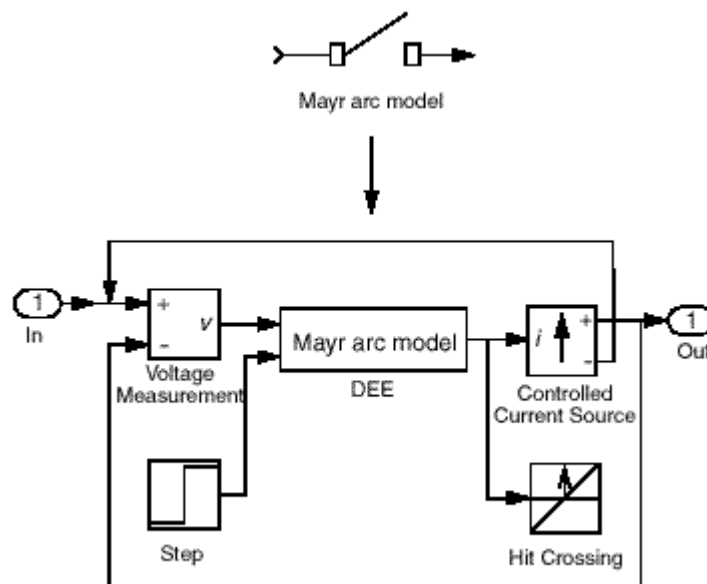


Рисунок 2.3 – Реалізація моделі дуги Майра (voltage measurement – вимірювання напруги, step – крок, controlled current source – кероване джерело струму, hit crossing – знаходження

попадання), DEE: Differential Equation Editor (РДУ: Редактор диференціального рівняння).

Рівняння моделі дуги Майра-Кассі були виведені за допомогою блоку Simulink шляхом рішення рівняння (2.4) в g координатах (2.8), для блоку РДУ (Редактор диференціального рівняння)

$$\begin{aligned} \frac{dx(1)}{dt} &= \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{e^{x(1)}u(1)^2}{P} - 1 \right), & \frac{d \ln g}{dt} &= \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{gu^2}{P} - 1 \right), \\ y &= e^{x(1)}u(1) & i &= gu \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $x(1)$ – параметр стану диференціального рівняння, який є природним логарифмом провідності дуги;

$x(0)$ – початкове значення параметра стану, т. е. значення провідності дуги: $q(0)$;

$u(1)$ – перший введення блоку РДУ, який є напругою дуги: u ;

$u(2)$ – другий вхід блоку РДУ, який являє собою зазор між контактами вимикача: $u(2) = 0$ – контакти замкнуті; $u(2) = 1$ – контакти розімкнуті;

y – висновок блоку РДУ, який є струмом дуги: i ;

g – провідність дуги;

u – напруга дуги;

i – струм дуги;

τ – постійна часу горіння дуги;

P – потужність.

Причому, τ і P – незалежні параметри моделі дуги Майра, які можуть бути встановлені за допомогою діалогу, як зображено на рисунку 2.4, який з'являється, якщо двічі клацнути мишкою на блоці моделі дуги Майра.

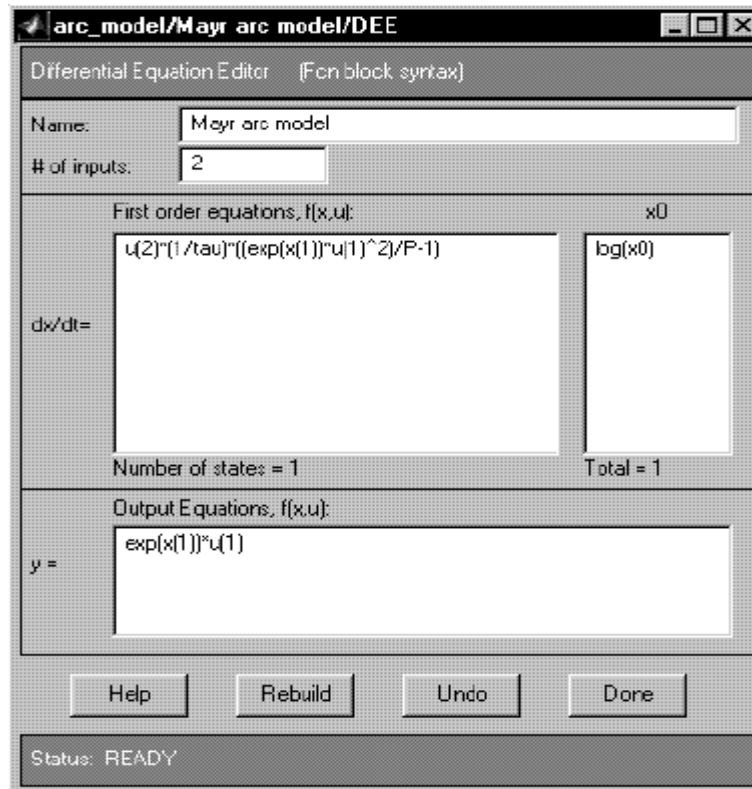


Рисунок 2.4 – Рівняння дуги Майра

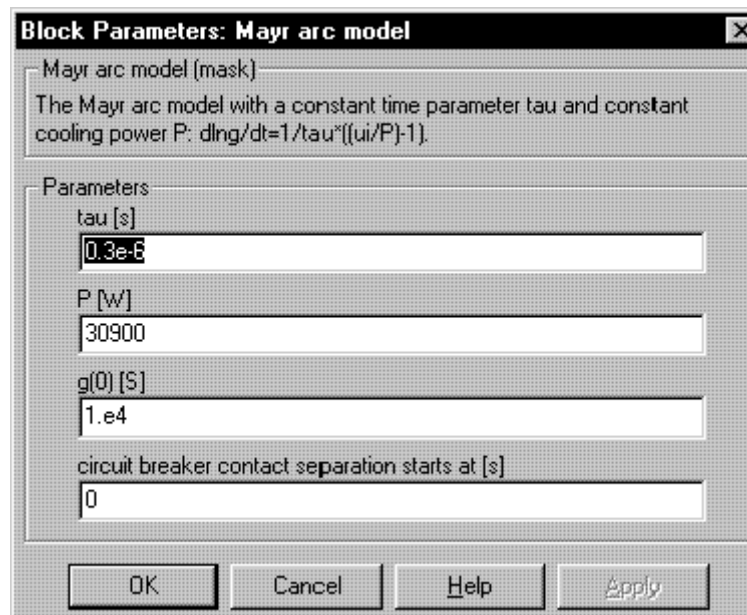


Рисунок 2.5 – Діалог моделі дуги Маяра

б) Hit Crossing (Знаходження попадання).

Блок "Знаходження попадання" виявляє, коли введення, в нашому випадку струм, проходить через нульове значення. Тому, регулюючи розмір кроку, блок неодмінно знаходить точку проходження струму через нуль.

Це має значення, оскільки момент поточного проходження струму через нуль вимикача, який веде себе, як нелінійний опір, є критичним моментом в процесі відключення, тому напруги і струми повинні бути обчислені точно.

в) Step (Крок).

Блок "Крок" використовується, щоб управляти розведенням контактів вимикача.

Крок призначений, щоб визначити один нуль в зазначений час розведення контактів.

Коли контакти замкнуті, починається вирішуватися наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{d \ln g}{dt} = 0. \quad (2.9)$$

Тому модель дуги поводитья як провідність зі значенням $g(0)$ [14].

При розведенні контактів вирішується наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{gu^2}{P} - 1 \right). \quad (2.10)$$

Початкове значення провідності дуги $g(0)$ і час розведення контактів вимикача визначені за допомогою діалогу моделі дуги, що відображується на рисунку 2 Додатку В.

Приклад реалізації моделі дуги виконаної за схемою прямої послідовності в BLOCKSET приведений в Додатку Б.

2.2 Модель дугового генератора в LabVIEW

2.2.1 Аналіз програмного забезпечення для графічного програмування LabVIEW.

У США компанією National Instruments була розроблена платформа середовище для розробки прикладних програм LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Метою даної платформи було створення умов для проведення обчислювань та математичного моделювання. Особливістю даної платформи являється те, що вона не потребує знань традиційних текстових мов програмування і тим самим робить середовище LabVIEW конкурентоспроможним таким системам програмування як MATLAB, MathCAD, Mathematica, MAPLE.

В LabVIEW використовується проста зручна мова графічного програмування "G".

Найбільш повно розкриваються можливості LabVIEW при створенні вимірювальних приладів та систем в лабораторних та промислових установках а також в установках для проведення наукових експериментів. Важливою перевагою LabVIEW являється можливість управління процесом вимірювання величин в автоматичному та інтерактивному режимах [21]. Для обробки та аналізу результатів використовується великий вибір функціональних бібліотек загального та спеціалізованого призначення.

У 1986 році для компанії Apple Macintosh була створена початкова платформа. Вона може працювати на різних операційних платформах, включаючи Microsoft Windows, UNIX, Linux та Mac OS X.

LabVIEW за допомогою програм-драйверів ефективно взаємодіє з різними платами вводу/виводу цифрових та аналогових даних, модулями обробки відеосигналів а також із спеціалізованими модульними вимірювальними приладами: осцилографами, аналізаторами спектру, генераторами сигналів та ін.)

В 2020 році вийшла найновіша версія LabVIEW – LabVIEW 8.20. У ній розширено можливості математичної обробки даних, покращена робота модуля реального часу (Real–Time Module) та підтримується взаємодія з елементами, реалізованими на платформі Microsoft .NET Framework 6.0.

Нові пакети дозволяють одержати дистанційний доступ до нових унікальних експериментальних стендів та організувати дистанційне навчання.

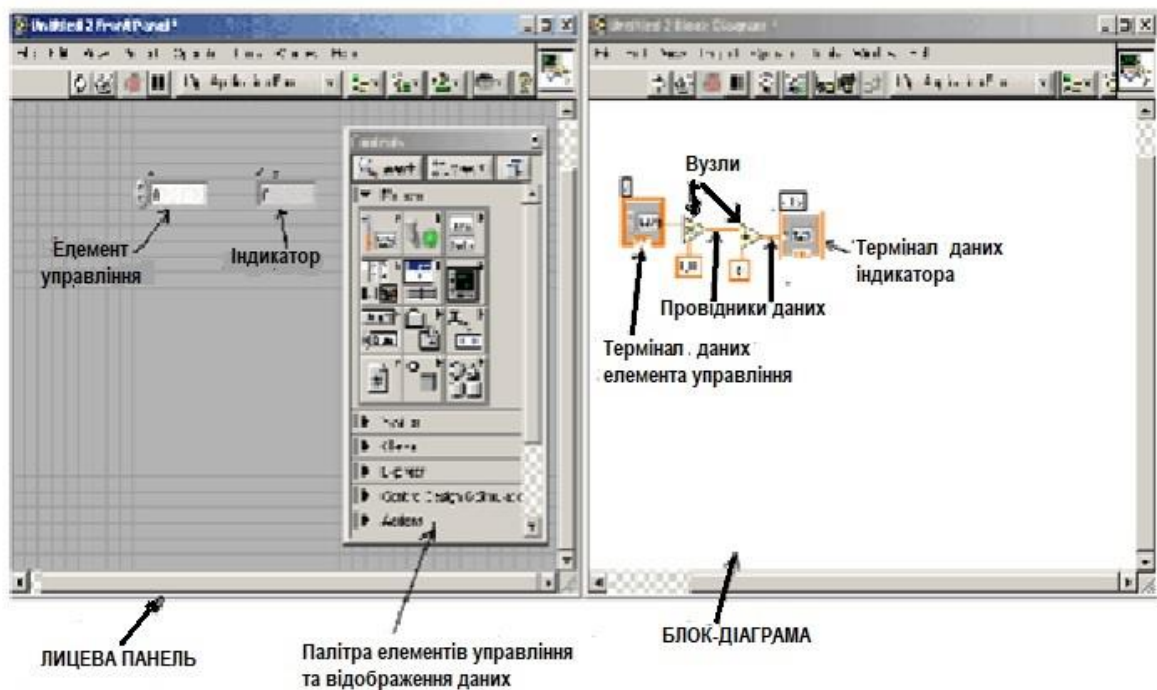


Рисунок 3.1. Графічне середовище програмування LabView

В LabView розробляти програму в графічному середовищі можна одночасно в двох вікнах: блок-діаграма (Block Diagram) та лицева панель (Front Panel) (рис.3.1). Графічний інтерфейс програми створюється на лицевій панелі у вигляді віртуального прибору (Virtual Instruments) де відбувається створення елементів управління та відображення, котрі в свою чергу являються інтерактивними засобами вводу та виводу даних цього віртуального прибору.

За допомогою елементів управління Controls (кнопки та інші прилади вводу даних) моделюються елементи вводу даних та їх подача на блок-діаграму. Елементи відображення моделюють засоби вводу даних та вхідну інформацію, котру одержжує а генерує блок-діаграма (рис.3.1). Палітра елементів управління показана на рисунку 3.2.

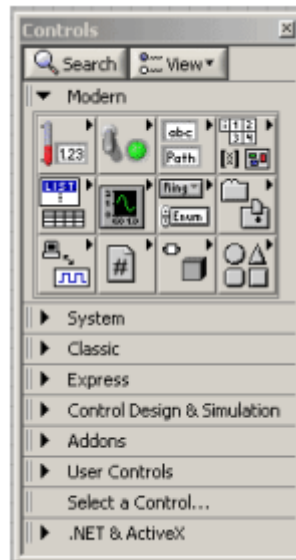


Рисунок 3.2. Палітра елементів управління та відображення

На блок-діаграмі розробляється початковий код майбутнього віртуального прибору, який складається із вузлів, терміналів і провідників даних.

Об'єкти на блок-діаграмі, які мають одне або декілька полів вводу /виводу даних та виконують виконують алгоритмічні операції віртуального прибору називаються вузлами [21]

Об'єкти лицевої панелі на блок-діаграмі відображаються в вигляді терміналів даних (Data terminals), які в свою чергу забезпечують обмін даних між блок-діаграмою та лицевою панелею (рис.3.1). За допомогою провідників даних (Wires), з'єднувальних ліній, інформація передається між об'єктами блок-діаграми. Слід відмітити, що кожен провідник даних може передавати інформацію багатьом функціям від одного джерела.

Об'єкти в LabView з'єднуються провідниками даних після їх розміщення на блок-діаграмі.

Таким чином можна відмітити, що LabVIEW включає також велику кількість інструментів та баз даних для створення практично повноцінних програм різноманітного призначення, в тому числі для електричних мереж, які працюють по технології клієнт/сервер [14].

2.2.2 Переваги та недоліки програмного забезпечення LabVIEW

Перед тим як визначити переваги та недоліки LabVIEW необхідно відмітити, що його базові пакети пройшли більш як 20-ти річний шлях розвитку та вдосконалення, крім того розробник щорічно оновлює базові пакети.

Всі переваги та недоліки даного програмного забезпечення показані в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Переваги пакету LabVIEW	
В чому полягає перевага	Чим досягається перевага
LabVIEW початково створювався не для програмістів, а для інженерів	Мова програмування G зроблені максимально просто для сприймання, тому швидкість засвоювання дуже велика
LabVIEW графічна мова програмування, за рахунок оперуванням «об'єктами».	Не потрібно трати час перевірку синтаксиса, пошук помилок та опечаток.
LabVIEW з самого початку створювався написання програм автоматизації для промисловості, учбових лабораторій.	В своєму складі має велику кількість бібліотек для роботи з периферією(робота з RS-232, LPT, USB, протоколи TCP/IP, UDP).
LabVIEW володіє величезним переліком бібліотек для обробки та аналізу сигналів, різних перетворювачів, фільтрів та ін.	При використанні додаткових модулів обробки сигналів даний список можна розширити до бескінченності.
LabVIEW це модульна система. Існують модулі машинного зору, модуль зоботи з звуком, крокові двигуни, модуль генерації звітів MS	Встановлення потрібного пакету модулів розширює можливості.

offise, Internet модуль для передачі даних.	
LabVIEW компілює повноцінний exe додаток.	Дозволяє створювати закінчений додаток.
LabVIEW дозволяє писати ПЗ для Windows Mobile, вбудовані системи на основі Linus та Windows, підтримує ARM мікроконтролери.	LabVIEW кросплатформне середовище для різних видів операційних систем
LabVIEW дозволяє створити закінченні додатки в дуже короткі терміни.	В LabVIEW дуже просто робиться налагодження і тестування програм.
LabVIEW дуже легко працює з паралельними потоками.	Паралельні потоки дуже легко створюються та працюють.
LabVIEW дозволяє створювати не тільки невеликі прості додатки, але і величезні проекти з великим числом приборів та датчиків.	
Недоліки пакету LabVIEW	
В LabVIEW присутні деякі обмеження, дуже незручно писати утеліти.	
В LabVIEW менша швидкість виконання операцій ніж в інших ПЗ.	
Для запуску додатків створених за допомогою LabVIEW на комп'ютері в якому не становлене середовище потрібно ставити LabVIEW Run-Time, який має дуже великий об'єм (біля 200 mb).	
Так як LabVIEW все таки призначений для рішення завдань автоматизації, збором інформації, обробкою даних з датчиків і т.д. то при рішенні більш загальних завдань програє класичним середовищам програмування.	

2.2.3 Складання та спрощення схеми дугового генератора в LabVIEW

При ознайомленні з даною програмою і з елементами лабораторної установки на принциповій схемі, що зображена на рис. 2.1 було з'ясовано, що для складання схеми потрібно використати такі устаткування як: джерело живлення, трансформатор, резистор і вугільні електроди. Всі ці параметри відсутні в програмному забезпеченні, адже програма призначена для самостійного графічного створення і програмування цих елементів.

Складання схеми розпочнемо із джерела живлення в якості котрого використаємося цифровий контролер за яким, будемо задавати параметри напруги рисунок 3.3.

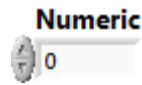


Рисунок 3.3 – Цифровий контролер

В якості трансформатора скористаємося контролером або диском управління для кращої наочності проведення досліду рисунок 3.4,

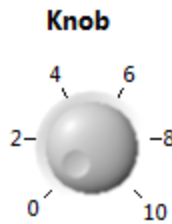


Рисунок 3.4 – Диск управління

в якості резистора використаємо значення константи яка буде здійснювати функцію віднімання (опору) від значення струму, в якості вугільних електродів скористаємося структурою ведення формул яка буде обраховувати довжину дуги рисунок 3.5,



Рисунок 3.5 – Структура для ведення формул

і подавати отримане значення на цифровий індикатор рисунок 3.6.

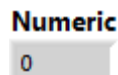


Рисунок 3.6 – Цифровий індикатор

Для зняття показів сили струму також використаємо цифровий індикатор.

При вище сказаному в схему додамо генератор випадкових чисел рисунок 3.7, для отримання змінного значення струму на осцилографі і коливань довжини дуги.



Рисунок 3.7 – Генератор випадкових чисел

Використовуємо також осцилограф , для більш якісної перевірки вірності отриманих значень рисунок 3.8.

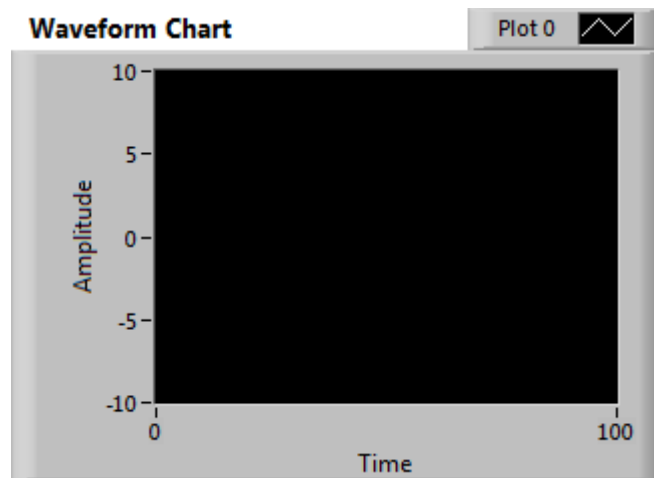


Рисунок 3.8. Осцилограф

Для отримання неперервних значень осцилографом також використано структуру while loop рисунок 3.9, вона забезпечує неперервний показ циклу осцилографа,

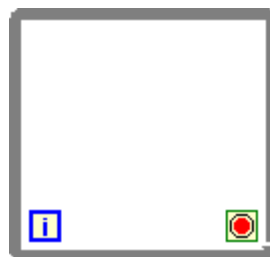


Рисунок 3.9 – While Loop

в якій реалізована кнопка зупинки циклу, тобто програми (рисунок 3.10).

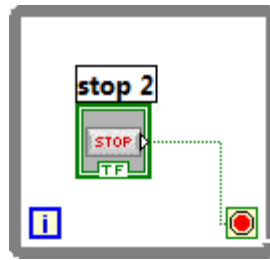


Рисунок 3.10 – Реалізація кнопки зупинки в циклі

Принцип роботи.

В загальному, дана установка буде складатися з двох основних ланок:

- головної ланки управління;
- ланки значення горіння дуги.

Головною ланкою даної схеми є ланка управління яка задає величину постійного струму. Дану ланку можна описати формулою :

$$\frac{V}{T} - R = I_n, \quad (3.1)$$

де I_n – значення постійного струму; V – значення напруги що задається цифровим контролером; T – значення параметра трансформатора живлення, яке задаємо диском управління; R – значення величини опору яке задається константою на панелі блок – діаграм.

Головна ланка управління зображена на рисунку 3.11.

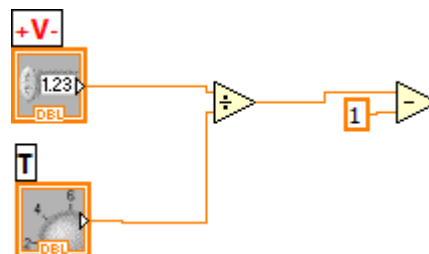


Рисунок 3.11 – Головна ланка управління

За допомогою головної ланки реалізується ланка значення горіння дуги, що зображена на рисунку 3.12.

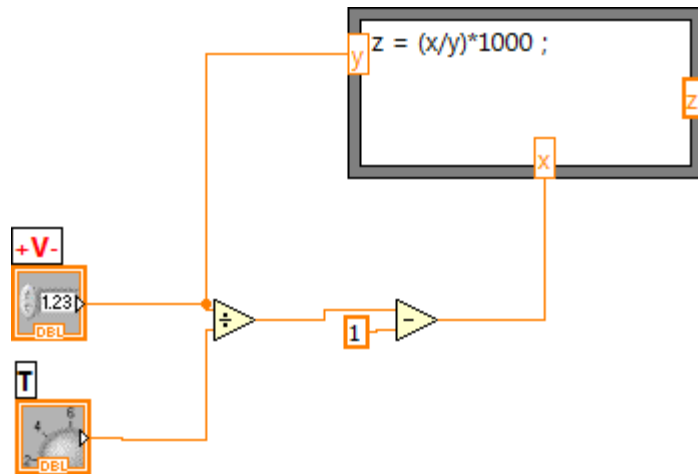


Рисунок 3.12 – Ланка значення горіння дуги

Вихідна ланка також описується формулою (3.2):

$$\left(\frac{x}{y}\right) \cdot 1000 = z. \quad (3.2)$$

Також цю формулу можна записати, як формулу (3.3):

$$\left(\frac{I_n}{V}\right) \cdot 1000 = L_n, \quad (3.3)$$

де $x = I_n$ – значення постійного струму;

$y = V$ – значення напруги що задається цифровим контролером;

$z = L_n$ – вихідний параметр постійного значення горіння дуги.

Значення змінних параметрів реалізуються додаванням генератора випадкових чисел до вихідних ланок .

Програмне забезпечення labview дозволяє реалізувати схеми будь-якої складності, змінювати їх тобто спрощувати або робити більш складними взаємозалежності від того, що потрібно отримати [18,20,21].

Дуговий генератор також можна змінити наприклад задати замість двох вугільних електродів – декілька електродів, в даному випадку можна скористатися декількома додатковими ланками або задати одну яку буде виконувати декілька функцій одночасно.

Дана програма дозволяє реалізувати автоматизовані системи управління тобто вона вже навіть не поступається matlab. Вона дозволяє запрограмувати кожен об'єкт окремо.

Виходячи з вище розглянутого зобразимо вже повністю складену установку, а також як працює дана схема.

Заданий параметр, що буде подаватись з джерела живлення буде виконувати функцію ділення на параметр заданий на трансформаторі зображеному на рисунку 3.13, і після цього буде реалізована функція віднімання деякого опору (константи) в результаті чого фактично отримаємо струм, що відводить на вугільні електроди для загорання дуги рисунок 3.14.

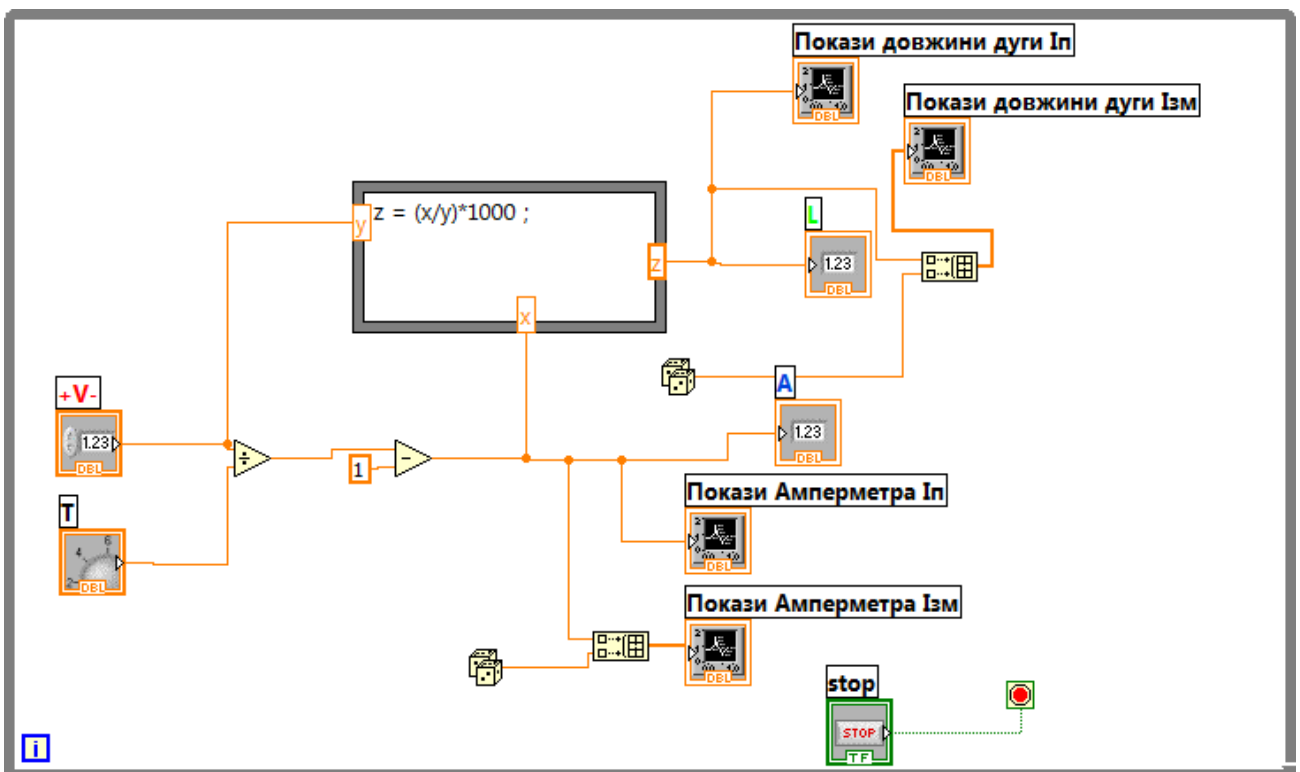


Рисунок 3.13 – Схема дугового генератора на панелі блок-діаграм



Рисунок 3.14 – Схема дугового генератора на лицьовій панелі

Для отримання довжини дуги використано експериментально виведену формулу, структура в якій вона реалізована – фактично являє собою мікроконтролер зображено на рисунку 3.3.

Генератор випадкових чисел фактично виконує функцію перетворення постійного значення струму в змінне значення струму, яке виводиться на осцилограф.

2.3. Проведення моделювання та розрахунку параметрів, що досліджувались

І так, схема зібрана спробуємо виконати моделювання і отримати потрібні дані.

Так, як ми не можемо утворити дугу, тому ми задамо сталі значення напруги і за допомогою трансформатора для кількох випадків ми змінюватимемо значення струму, а при цьому і значення напруги.

Задаємо сталі значення напруги 220В, значення на тумблері проведемо перемикання для 5 випадків: 5,25,50,75,100.

I – ВИПАДОК

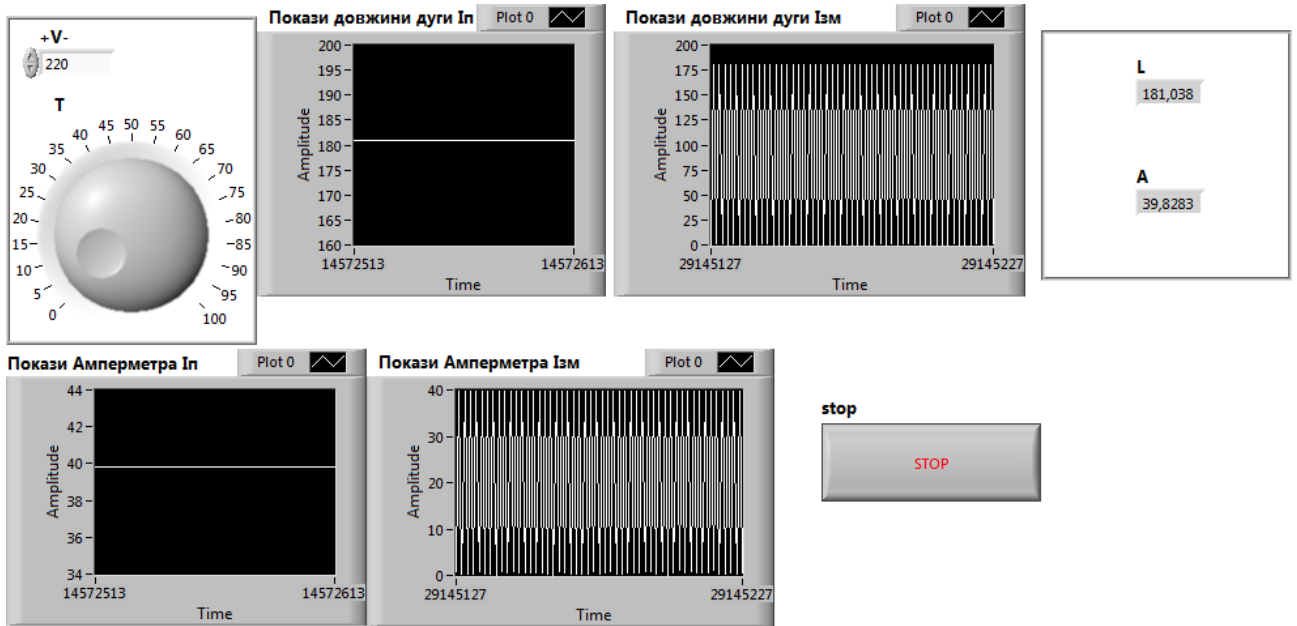


Рисунок 3.15 – Покази постійних і змінних значень струму та довжини дуги

Отримали такі покази ($T = 5$):

$$I = 39,8A;$$

$$L = 181\text{мм}.$$

II – ВИПАДОК

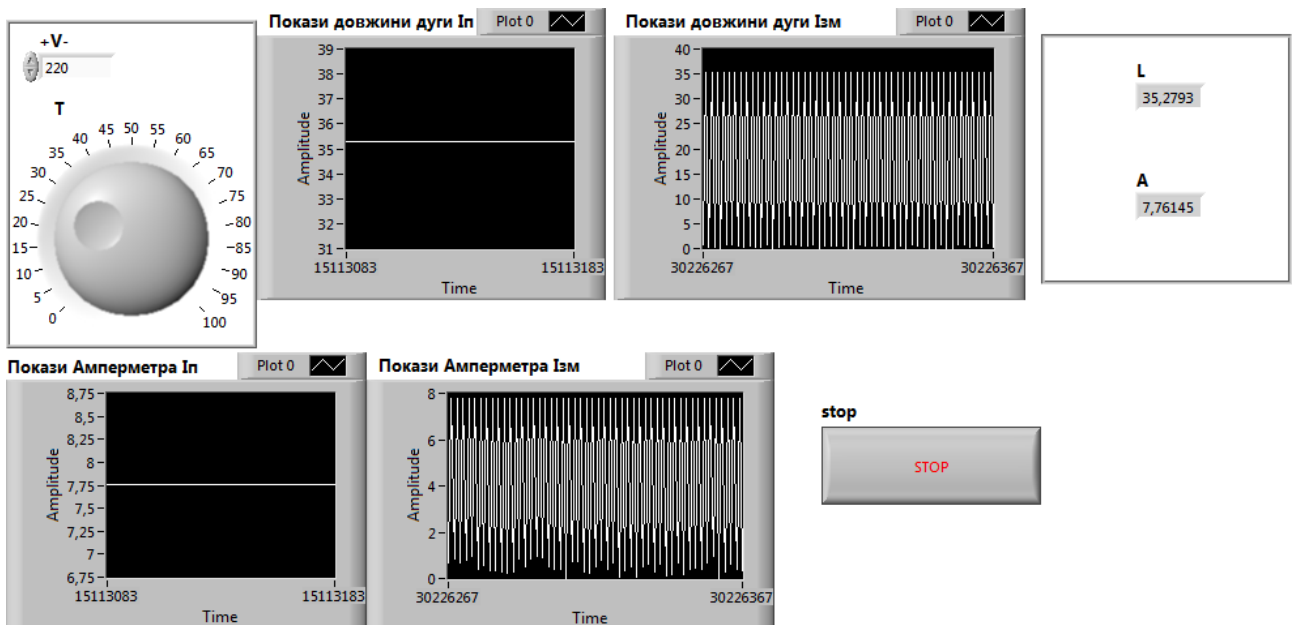


Рисунок 3.16 – Покази постійних і змінних значень струму та довжини дуги

Отримали такі покази ($T = 25$):

$$I = 7,8A;$$

$$L = 35,3\text{мм}.$$

III – ВИПАДОК

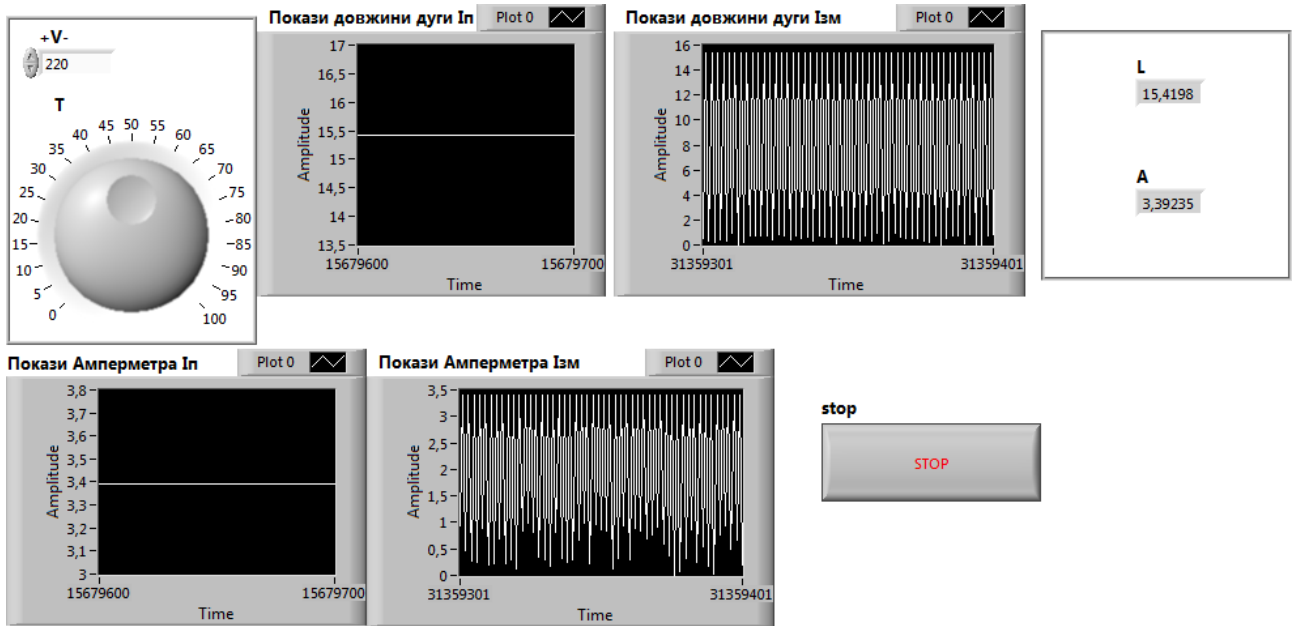


Рисунок 3.17 – Покази постійних і змінних значень струму та довжини дуги

Отримали такі покази ($T = 50$):

$$I = 3,4A;$$

$$L = 15,4\text{мм.}$$

IV – ВИПАДОК

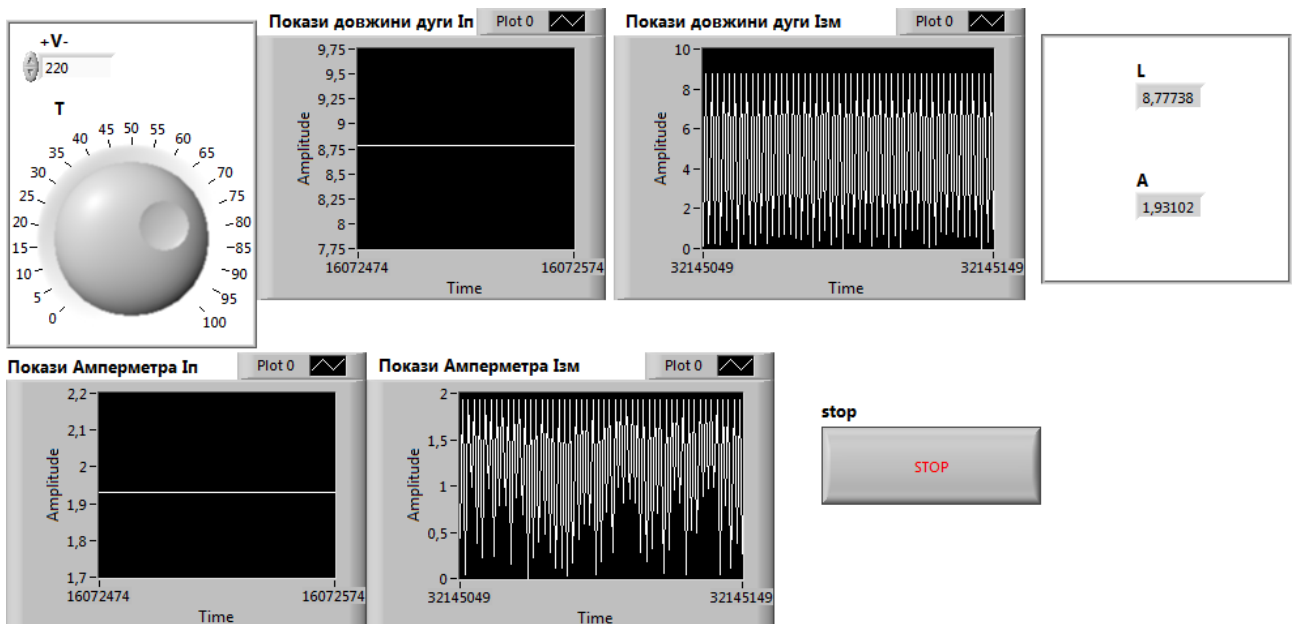


Рисунок 3.18 – Покази постійних і змінних значень струму та довжини дуги

Отримали такі покази ($T = 75$):

$$I = 1,9A;$$

$$L = 8,8\text{мм.}$$

V – ВИПАДОК

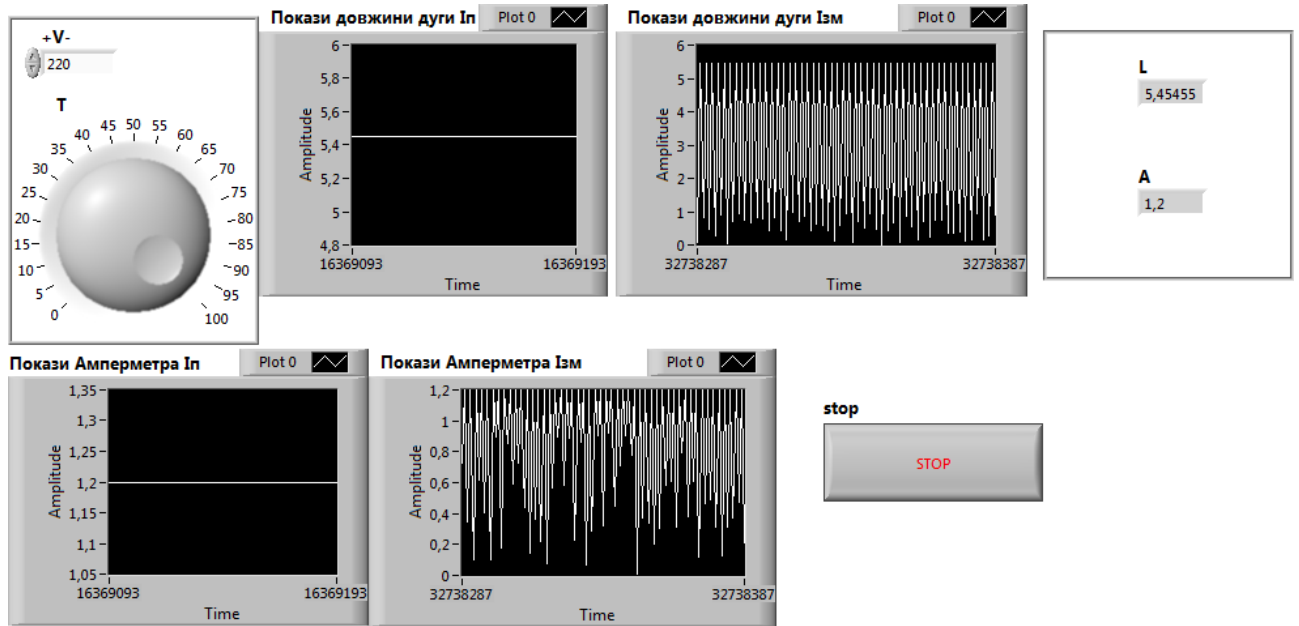


Рисунок 3.19 – Покази постійних і змінних значень струму та довжини дуги

Отримали такі покази ($T = 100$):

$$I = 1,2 A;$$

$$L = 5,45 \text{ мм}.$$

Результати вимірювань і графіки залежностей при моделюванні дугового генератора занесені у Додаток А.

Висновок по другому розділу

В даному розділі було здійснено моделювання дугового генератора в LABVIEW.

Розглянуто опис та аналіз програмного забезпечення, його переваги та недоліки, а також провели складання та спрощення схеми і після цього проведено моделювання.

В якості лабораторного стенду було використано схему простого дугового генератора, що являє собою пристрій, що перетворює енергію постійного струму в електромагнітні коливання високої частоти за допомогою дугового розряду через зазор, підключений паралельно ланцюга та містить конденсатор і котушку індуктивності.

В схемі було знехтувано такими елементами: опором втрат електричної потужності, котушкою індуктивності і конденсатором.

В загальному вигляді модель дугового генератора складається з двох основних ланок:

- головної ланки управління;
- ланки значення горіння дуги.

Основним недоліком також, сумніви чи LabVIEW є повноцінною мовою програмування.

ВИСНОВОКИ

В роботі проаналізовані аналітичні залежності, які дозволяють визначити параметри вибраної математичної моделі дуги в випадку живлення від синусоїдального джерела живлення.

Узагальнена математична модель динамічної дуги найбільш адекватно описує динаміку електричної дуги як елемента електричного кола та дозволяє моделювати переходні процеси в електричних ланцюгах з електричною дугою.

На основі бібліотечної Simulink - моделі електричної дуги побудовані часові діаграми роботи такої моделі, графіки залежності динамічного опору дуги та залишкового опору дуги при переході струму через нуль.

Було здійснено моделювання дугового генератора в LabVIEW.

Розглянуто опис лабораторного устаткування, аналіз програмного забезпечення, його переваги та недоліки, а також провели складання та спрощення схеми і після цього проведено моделювання.

Розроблено схему простого дугового генератора, що являє собою пристрій, що перетворює енергію постійного струму в електромагнітні коливання високої частоти за допомогою дугового розряду через зазор, підключений паралельно ланцюга та містить конденсатор і котушку індуктивності.

ВИКОРИСТАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА

- 1.Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с
- 2.Шельгазе М. Математическая модель переходных процессов в сварочной дуге и ее исследования // Автоматическая сварка. 1971. № 7. С. 7–9
- 3.Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги. – Автоматическая сварка, 1989, № 2 (431), с. 33–36.
- 4.Патон Б.И., Завадский В.А. Импульсное зажигание дуги при газозлектрической и ручной дуговой сварке// Автоматическая сварка.– 1956.– 3.–С.26-35
- 5.Пентегов И.В. Математическая модель столба динамической электрической дуги // Автоматическая сварка. 1976. № 6. С. 8–12.
- 6.Савицки А., Хальтоф М., Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источником тока// Электричество, 2016, №1, с.25–34.
- 7.Сидорец В.Н., Андрианов А. А. Методы анализа режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока// Технічна термодинаміка, 2007, Тематичний випуск, Силова електроніка та енергоефективність. Частина 5. –С.71–74.
8. Гарке, В.Г. К вопросу о сопротивлении электрической дуги / В.Г. Гарке // Изв. АН ЛССР, серия физ. и техн. наук. – №1. – 1971.
- 9.Методы анализа нелинейных математических моделей./М. Холодниок, А. Клич, М. Кубичек, М. Марек –Москва:Мир, 1991. –368 с.
10. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). Учебн. пособие для вузов. [Изд. 2-е, доп. и перераб.] / В. А. Веников. – М. : Высшая школа, 1976. – 479 с.

11. Степанов А.П., Сотокина Ю.В., Чернова С.А. Одномерные модели электрической сварочной дуги. Теория и практика сварочного производства // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – № 2 (15). – С. 32–40.

12. Г. В. Буткевич, Дуговые процессы при коммутации электрических цепей, Москва: Высшая школа, 1967.

13. Sawicki A., Haltof M. Metoda widmowa wyznaczania parametrów modeli Mayra i Cassiego ³uku elektrycznego. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2015, nr 2, pp. 54–56, 59, 60.

14. А. Г. Васильев, Моделирование температурного профиля в плазме дугового разряда, Казань: Сборник тезисов участников форума НБНМ, 2016, р. 393.

15. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK // Электроэнергетика и электротехника. – 2013. – № 2. – С. 40–46.

16. Г. В. Буткевич, Дуговые процессы при коммутации электрических цепей, Москва: Высшая школа, 1967.

17. Е. Н. Васильев, Диаграммы состояния стационарного дугового разряда в воздухе, т. 82(12), Журнал технической физики, 2012.

18. <https://habr.com/ru/post/57859/>

19. <https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html>

20. <https://digital.ni.com/worldwide/russia.nsf/web/all/>

21. Тревис Дж. LabVIEW для всех. М: ДМК Пресс, ПриборКомплект, 2005 – 544 с.

ДОДАТОК А

Результати моделювання напруги та струму дуги

Для ланцюга з електричною дугою було проведено дослідження. Мета такого моделювання системи «джерело живлення – дуга» має дві цілі: по-перше, спостерігати взаємодію ланцюга з електричною дугою (досліджувати нелінійну динамічну дисипативну систему) і, по-друге, продемонструвати той факт, що обрана модель є простою з точки зору реалізації і вимагає меншої апріорної інформації про фізичні параметри дуги і в той же час вимоги точності можуть бути забезпечені відповідним вибором параметрів моделі.

При дії на вході двополюсника напруги (струму) нелінійний ланцюг із заданою точністю відтворює залежність струму (напруги) для певних значень t , що показано на рисунку 1 і 2. Характеристики, які відповідають шуканому квазі сталому режиму, одержують в результаті виходу на даний режим роботи через перехідний процес при нульових початкових умовах. В результаті моделювання були отримані тимчасові характеристики $u_d = u(t)$, $i = i(t)$ на рисунку 1 і 2. На рисунку 1,б, та 2,б показані і діаграми значень $R_{ст}$, $R_{дф}$ і потужності, що підводиться P . Величини $R_{ст}$, $R_{дф}$ і P на всіх струмах з високою точністю збігаються з відповідними параметрами, отриманими на моделі і не вимагають уточнення вихідного рівняння.

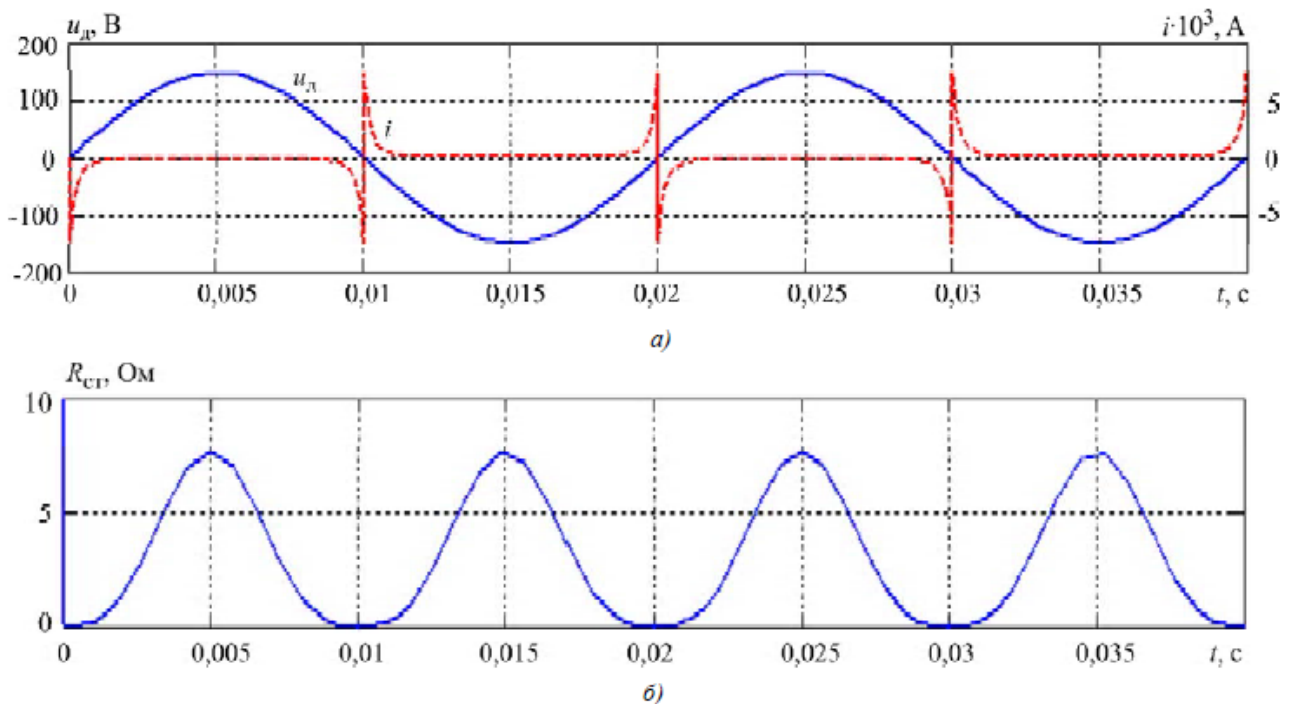
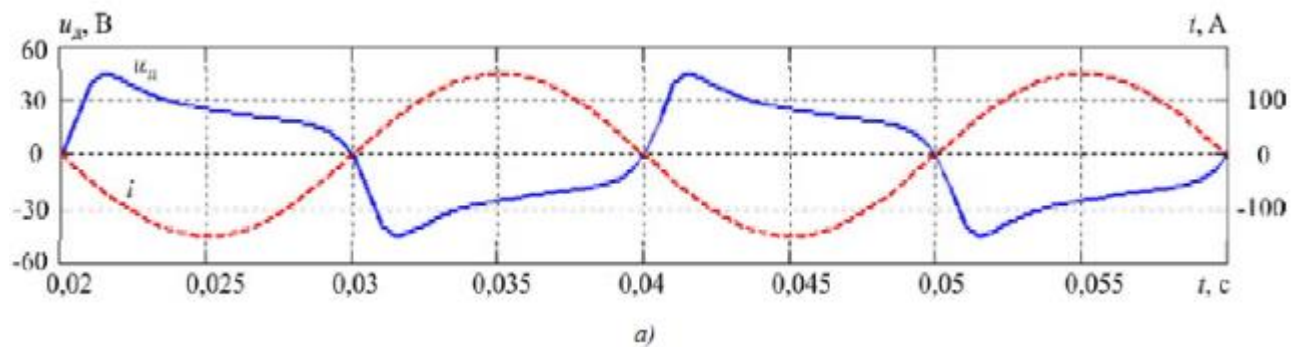


Рисунок 1 – Тимчасові діаграми напруги і струму дуги (стисла дуга - $\tau = 1 \times 10^{-6}$ с): позитивні напрямки струму і напруги протилежні (а) і діаграма зміни опору дуги $R_{сг}$ (б) великої потужності при сталому режимі

У загальному випадку параметри $R_{сг}$, $R_{дф}$ можуть бути представлені як функціями часу, так і функціями струму.

На рисунку 1 представлена залежність активного миттєвого опору $R_{сг}(t)$, яке характеризує навантаження ВП. Тепер останню можна замінити на відповідне $R_{дф}(i)$ що показано на рисунку 3.



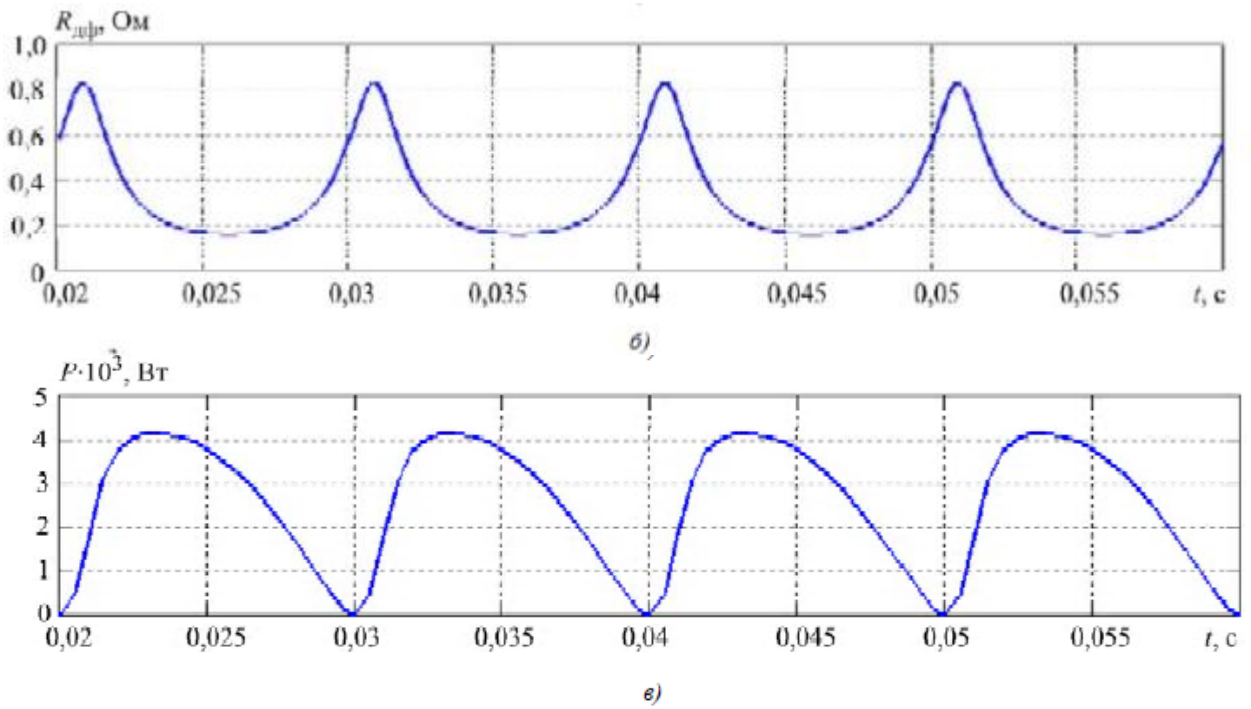


Рисунок 2 – Часові діаграми напруги і струму дуги (вільна дуга – $\theta = 1 \times 10^{-3}$ с) при споживанні її змінним струмом синусоїдальної форми і частотою 50 Гц: позитивні напрямки струму і напруги (u_d) протилежні (а) і осцилограми значень $R_{дф}$ (б), P (в)

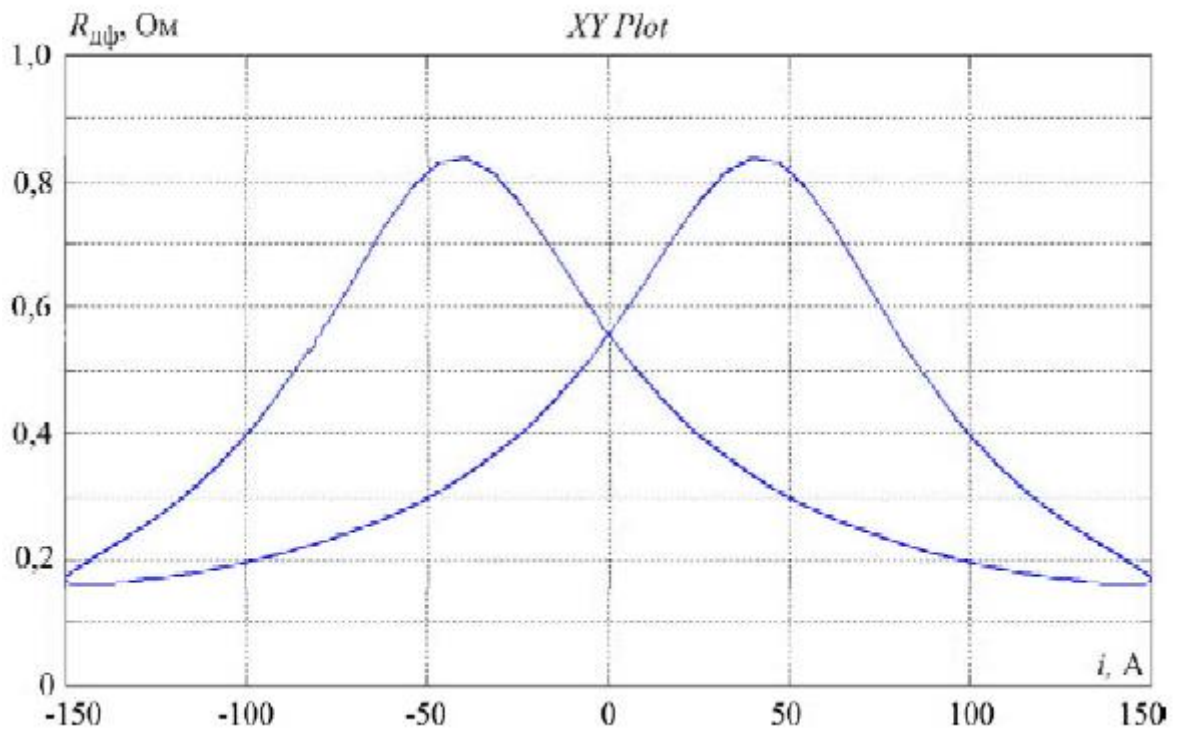


Рисунок 3 – Залежність динамічного опору дуги $R_{дф}$ від струму дуги i

У разі дуги змінного струму інерція обумовлює ту обставину, що опір дуги при переході струму через нуль не приймає нескінченно великого значення, як це можна було б припускати на підставі усталеної характеристики, і що залежно від охолодження дуги утворюється більш-менш значний залишковий опір $R_{дф0}$.

Тут же відзначимо, що зважаючи кінцевого значення опору в момент переходу струму через нуль напруга електричної дуги разом з потоком стає рівним нулю показано на рисунках 1, 2. Характеристику дуги змінного струму, зображену на рисунку. 4, називають динамічною характеристикою.

Виявляється, що при падаючому струмі вона проходить нижче усталеної (статичної) характеристики, а при зростаючому струмі – вище неї. Це означає, що внаслідок інерції електричної дуги її динамічний опір при падаючому струмі завжди менше статичного опору, а при зростаючому струмі – завжди більше статичного.

З рисунку 2 видно, що після переходу струму через нуль динамічний опір дуги спочатку продовжує зростати і лише після закінчення відомого часу починає знову зменшуватися, якщо потужність, що підводиться P перевищує втрати P_0 то дуга знову нагрівається.

У момент переходу струму через нуль, підведена потужність $P = u \cdot i$ дорівнює нулю, а потім вона зростає. з цього малюнка також видно, що диференціальне рівняння динамічної дуги містить в собі баланс її енергії.

При зниженому струмі потужність, що підводиться завжди менше потужності втрат, так що дуга безперервно охолоджується, в той же час при зростаючому струмі підведена потужність вище відводиться і дуга при цьому нагрівається.

На закінчення слід зазначити, що застосування імітатора електричної дуги має великі перспективи для проведення цілої сукупності випробувань зварювальних джерел живлення. На його основі реалізуються різні дуги як постійного струму, в тому числі і модульованого, так і змінного струму.

Варіюванням постійної часу τ можна імітувати різні покриття електродів і різні захисні гази. Зрозуміло, безсумнівний інтерес представляє використання імітатора і для визначення ККД зварювальних джерел живлення [15].

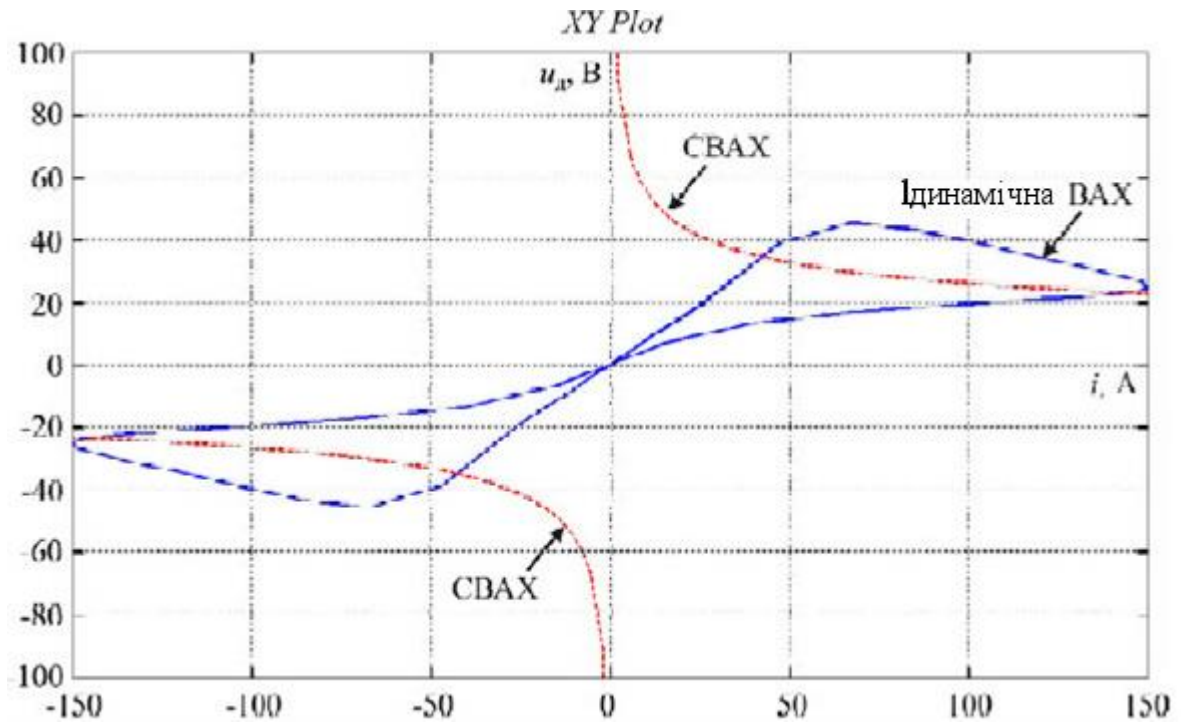


Рисунок 4 – Динамічна ВАХ дуги

ДОДАТОК Б

Реалізація та обчислення моделі дуги BLOCKSET

Моделі дуги виконуються за схемою прямої послідовності. Приклад схеми, що містить модель, зображений на рисунку 1.

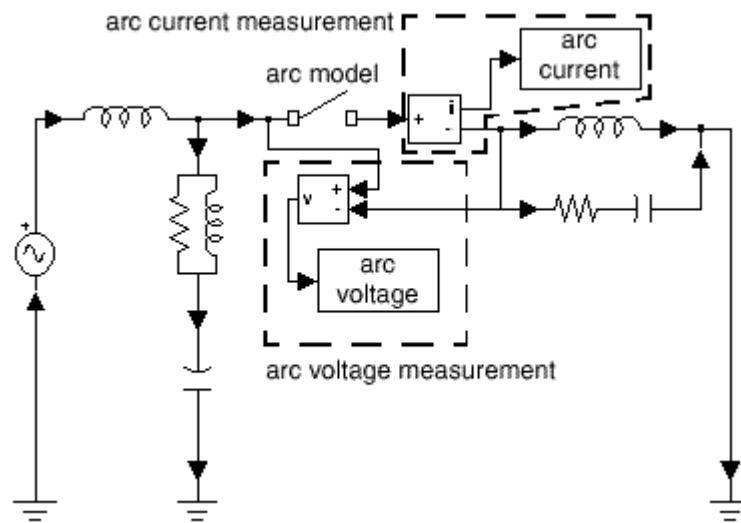


Рисунок 1 – Модель дуги Маяра на прикладі тестового ланцюга (arc current measurement – вимірювання струму дуги, arc current – струм дуги, arc voltage measurement – вимірювання напруги дуги, arc voltage – напруга дуги)

Обчислені напруги і струми показані на рисунках 1 і 2 при часі розведення контактів вимикача $t = 0\text{с}$.

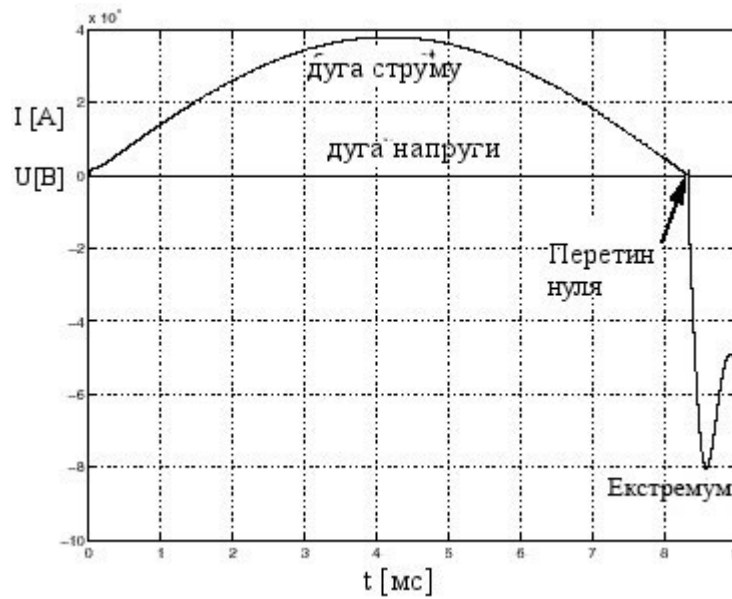


Рисунок 1 – Обчислені напруги і струми з часом розмикання контактів $t = 0c$

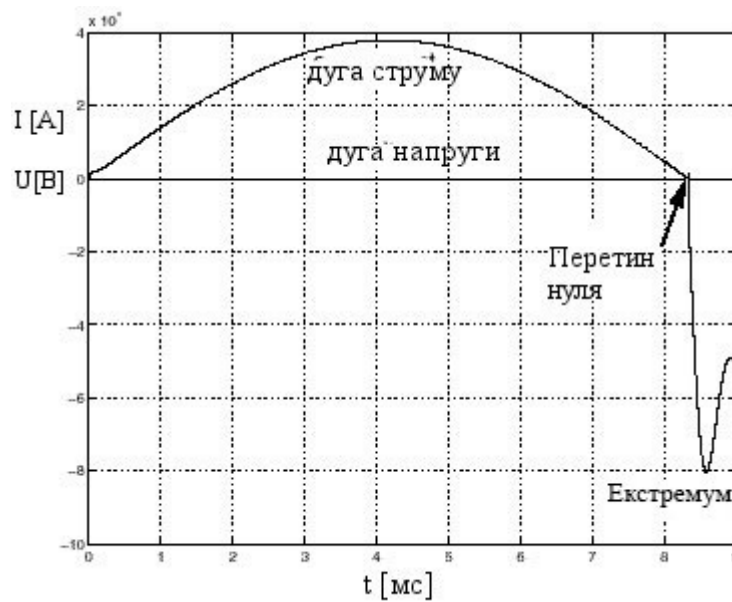


Рисунок 2 – Обчислені більш детально напруги і струми

Обчислені напруги і струми показані на рисунку 3 при часі розмикання контактів вимикача $t = 9c$.

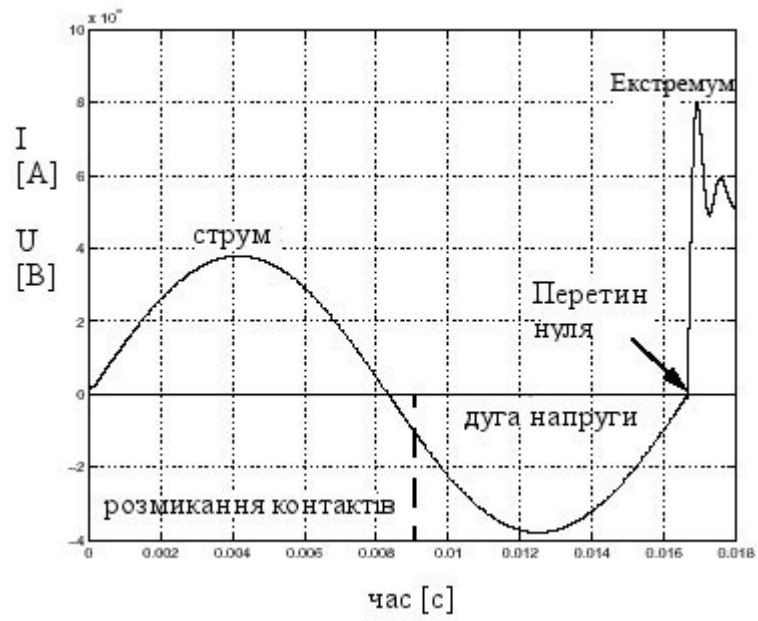


Рисунок 3 – Обчислені напруги і струми з часом розведення контактів

$$t = 9с$$