УДК 621.791.76

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ І НАПРУГ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГРУПИ МАШИН ТОЧКОВОЇ КОНТАКТНОЇ ЗВАРКИ

Н.М. Погрібняк (канд.техн.наук, доц.), ***В.В. Мухін***
Донецький національний технічний університет
N.N.Pogrebnyak@gmail.com

Запропонований універсальний алгоритм розрахунку струмів і напруг в електричній мережі, що живить групу машин точкової контактної зварки, при будь-якій кількості та комбінації ввімкнених зварювальних машин з різною кількістю фаз. Алгоритм буде застосований для визначення максимальних розрахункових значень пікових струмів і втрат наруги в мережі електропостачання групи машин точкової контактної зварки.

Піковий струм, втрата напруги, електрична мережа, машина точкової контактної зварки

Робота машин точкової контактної зварки (МТКЗ) характерна значними піковими струмами, що сягають кількасот ампер при тривалості імпульсів до декількох періодів при малих коефіцієнтах ввімкнення. Для забезпечення якості зварювання необхідно обрати мережу живлення групи зварювальних машин таким чином, щоб відхилення напруги у мережі живлення МТКЗ не перевищували 10% [1]. Вибір апаратів захисту потребує визначення пікових струмів, що створюються групою зварювальних машин. Розрахунки втрат напруги та пікових струмів виконуються за діючими Вказівками [2], в основу яких покладена двохступінчаста впорядкована діаграма зварювальних струмів МТКЗ або втрат напруги, що призводить до завищення результатів при розрахунку втрат напруги і створює певний запас при виборі електричної мережі, збільшення капітальних витрат на неї.

Розглянемо живлення групи МТКЗ від нерозгалуженого шинопроводу. Рішенням задачі є функції розподілу пікових струмів і втрат напруги у мережі, за якими визначаються максимальні розрахункові значення цих величин із заданою граничною ймовірністю. Для отримання функцій розподілу необхідно розраховувати струми і напруги у мережі при всіх можливих варіантах одночасного ввімкнення одно-, двух- і трифазних зварювальних машин, що підключені до шинопроводу на різних відстанях від джерела живлення. Отже, кожному варіанту ввімкнення зварювальних машин відповідає своя електрична схема. Розрахунок струмів і напруг для такої кількості різних схем можна виконати тільки за умови програмного формування матриць з'єднань, контурів, опорів і ЕРС. Метою цієї роботи є розробка алгоритму і програми формування цих матриць та розрахунок струмів і напруг у мережі для будь-якого варіанта одночасного ввімкнення зварювальних машин.

Розглянемо алгоритм на прикладі схеми підключення дванадцяти зварювальних машин (рис. 1). На схемі перша машина – однофазна, підключена на лінійну напругу до фаз А,В; друга – трьохфазна; четверта – двохфазна, підключена на лінійні напруги ВС і СА. Схемі підключення зварювальних машин за умови ввімкнення 1, 4, 5, 7, 8, 9, 10 машин (на рис. 1 їх номера обведені колом) відповідає схема на рис. 2. У цій схемі номера вузлів підкреслені, номера ввімкнених МТКЗ обведені колом, номера контурів обведені квадратами, номера гілок позначень не мають. Гілка 3 відповідає машині з номером 1, гілки 7,8 – четвертій машині. У прикладі вузли 16, 18 та гілки 29,30 забезпечують більш зручний розрахунок напруги на найвіддаленішій зварювальній машині, крім того, ці «зайві» вузли та гілки утворюються внаслідок формального формування матриць, що задають розрахункову схему.

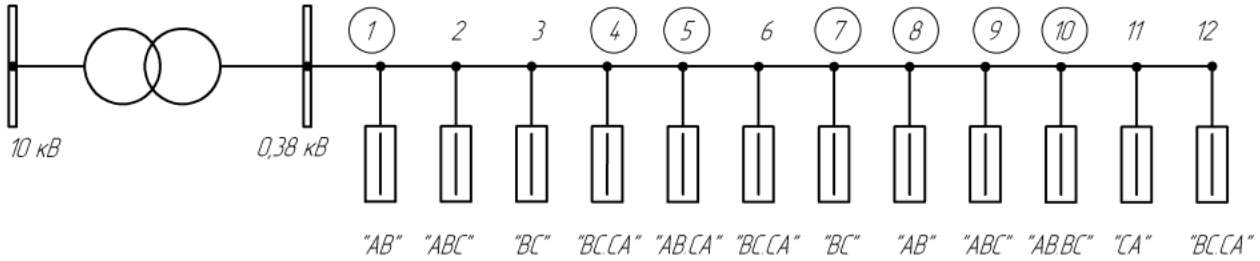

Рисунок 1 – Схема підключення МТКЗ

У моделі кожну однофазну або фазу багатофазної МТКЗ представляємо опором

$$z = \frac{j \cdot r \cdot x}{r + j \cdot x},\ r = \frac{U_н^2}{S_н \cdot \cos\varphi_н},\ x = \frac{U_н^2}{S_н \cdot \sin\varphi_н}, \qquad (1)$$

де $S_н$, $U_н$, $\cos\varphi_н$ - номінальні повна потужність (однофазної зварювальної машини або фази багатофазної), напруга та коефіцієнт потужності МТКЗ.

Для встановлення зв'язку між гілками та відповідними зварювальними машинами вводимо коди гілок і вузлів: гілки і вузли, що належать фазі А матимуть код 1; фазі В – 2; фазі С- 3. Гілки, що підключені між фазами А,В, позначаємо кодом 4; між фазами В і С – кодом 5; між фазами С і А– кодом 6. Зв'язок між гілками, вузлами та контурами схеми і зварювальними машинами відображається у матрицях:

- допоміжна матриця гілок V. Кількість стовпців матриці дорівнює кількості гілок. У першому рядку за-

писуємо номер ввімкненої зварювальної машини, при ввімкненні якої додаються ці гілки до схеми, у другому – код гілки (на рис. 3, 4 елементи цієї матриці виділені сірим кольором та напівжирним курсивом);

- допоміжна матриця вузлів UZ . Кількість рядків матриці дорівнює кількості вузлів. У першому стовпці записуємо номер ввімкненої зварювальної машини, що підключена до вузла, у другому – код вузла (на рис. 3 елементи цієї матриці виділені сірим кольором та напівжирним шрифтом з підкресленням);

- допоміжна матриця контурів K . Кількість рядків матриці дорівнює кількості контурів. У першому стовпці записуємо номер ввімкненої зварювальної машини, фаза якої утворює контур, у другому – код гілки, що відповідає фазі зварювальної машини (на рис. 4 елементи цієї матриці виділені сірим кольором та напівжирним шрифтом з підкресленням).

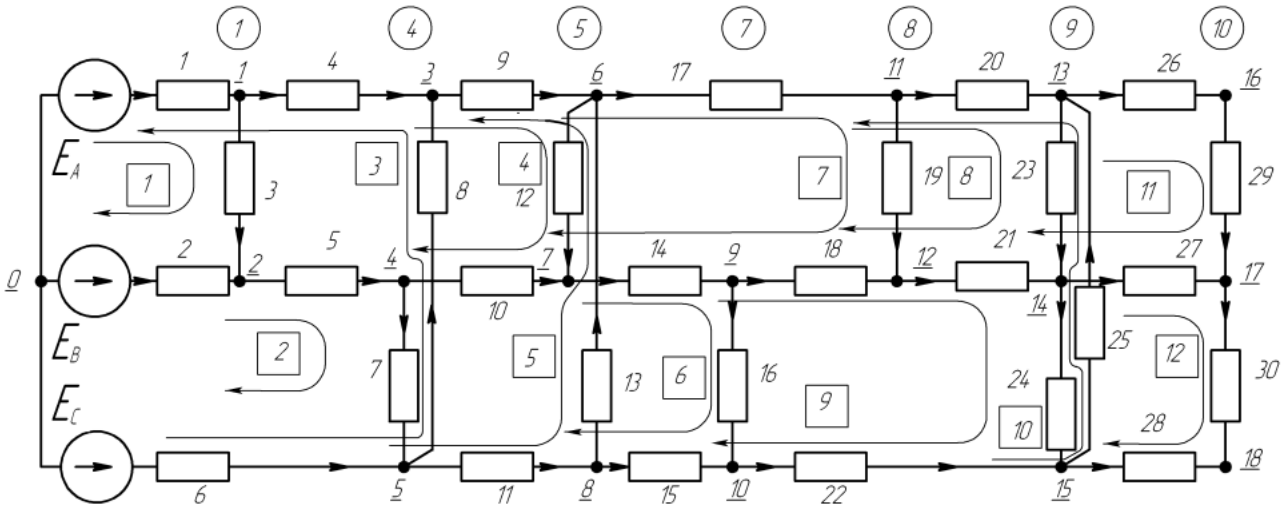

Рисунок 2 – Розрахункова схема при ввімкненні 1, 4, 5, 7, 8, 9, 10 МТКЗ

Для забезпечення можливості формального формування матриць, що задають структуру схеми, обираємо однотипні правила вибору контурів, напрямів їх обходу, напрямів гілок, порядку запису гілок в матрицях контурів, з'єднань, опорів:

- при появі нової гілки, що відповідає фазі багатофазної або однофазній МТКЗ, утворюється новий контур, до якого включаємо усі гілки ділянок фаз шинопроводу, до яких підключена зварювальна машина, в бік джерела живлення і гілки з ЕРС джерела живлення;

- гілки, що відповідають ділянкам фаз шинопровода, направлені від джерела живлення;

- напрями гілок, що відповідають фазам зварювальних машин, для всіх машин прийняті: від фази А до В, від фази В до С та від С до А;

- напрями обходу контурів – співпадають з напрямами гілок, що відповідають фазам зварювальних машин;

- при записі гілок у матрицях з'єднань, контурів, опорів; вузлів у матриці з'єднань; контурів у матриці контурів, що з'являються при підключенні зварювальної машини, встановлюється такий порядок: гілки та вузли записуємо за зростанням коду, а контури – за зростанням коду гілки, що відповідає фазі зварювальної машини, яка утворює контур. Виключенням є тільки однофазні зварювальні машини, підключені до фаз С, А. Для них порядок запису гілок у всіх матрицях буде таким: спочатку з кодом 3 (фаза С), потім з кодом 1 (фаза А) і з кодом 6 (гілка, підключена між фазами С, А).

При формуванні матриць з'єднань і контурів всі зварювальні машини розглядаються по черзі за збільшенням відстані від джерела живлення. Розглянемо алгоритм формування транспонованої матриці контурів (рис. 3, на рисунку елементи матриці контурів записані на білому фоні звичайним шрифтом). Підключення однофазної зварювальної машини призводить до утворення одного контуру, додає три гілки. При прийнятих напрямках гілок, контурів, черзі запису гілок, вузлів та контурів, для врахування підключення однофазної зварювальної машини до будь-яких фаз необхідно приєднати до матриці контурів блок

1	-1	1

Границі цих блоків обведені лінією у матриці контурів на рис. 3 (зварювальні машини 1, 7, 8).

Приєднання відповідних блоків для зварювальних машин з будь-якою кількістю фаз починається з наступних за останніми рядка і стовпця раніше сформованої частини матриці контурів.

Для трифазної зварювальної машини до матриці контурів приєднується блок:

1	-1	0	1	0	0
0	1	-1	0	1	0
-1	0	1	0	0	1

Таким чином, кількість контурів збільшується на 3, гілок – на 6 (зварювальна машина № 9 у прикладі).

Блоки, що приєднуються до матриці контурів при підключенні двохфазної зварювальної машини, отримуємо з

блока для трифазної зварювальної машини шляхом видалення рядків і стовпців, що відповідають відсутній фазі (ці рядки і стовпці виділені сірим кольором):

Фази, до яких підключена двохфазна зварювальна машина	«АВ.ВС»	«ВС.СА»	«СА.АВ»
Блок у матриці контурів	1 -1 0 1 0 0 0 1 -1 0 1 0 -1 0 1 0 0 1	1 -1 0 1 0 0 0 1 -1 0 1 0 -1 0 1 0 0 1	1 -1 0 1 0 0 0 1 -1 0 1 0 -1 0 1 0 0 1

Підключення двохфазної зварювальної машини додає 2 контури, 5 гілок (зварювальні машини № 4, 5 ,10).

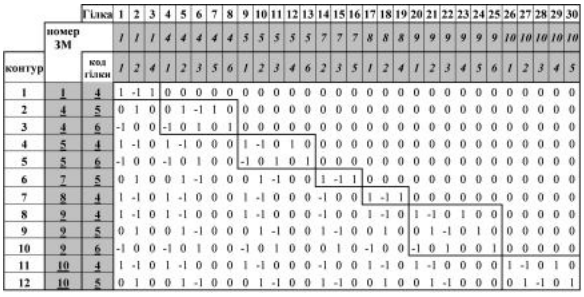

Рисунок 3 – Транспонована матриця контурів та допоміжні матриці гілок V і контурів K для приклада на рис. 1, 2

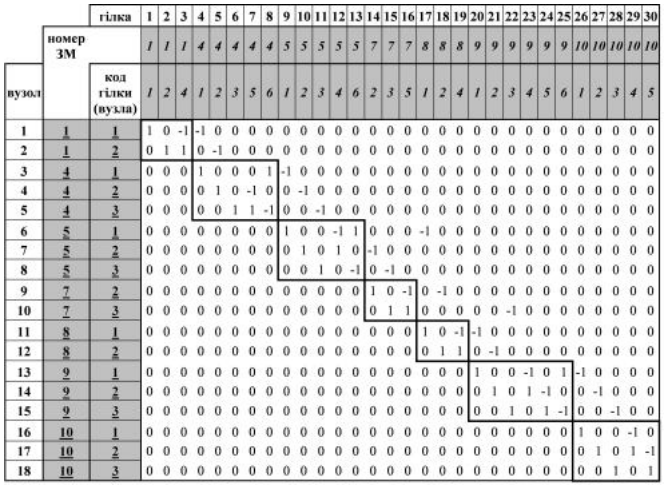

Рисунок 4 –Матриця з'єднань та допоміжні матриці гілок V і вузлів UZ для приклада на рис. 1, 2

Для включення в контур гілок, що відповідають ділянкам фаз шинопровода, розташованим у бік джерела живлення, достатньо формально присвоїти елементам матриці контурів, що знаходяться у стовпцях з номерами, меншими, ніж стовпці, в які записаний виділений рамкою блок, ті ж значення, що записані для гілок з тими ж кодами у виділеному блоці. Ця дія має виконуватись незалежно від кількості фаз МТКЗ для кожного доданого рядка матриці з'єднань при розгляді чергової зварювальної машини, крім першої. Всі інші елементи матриці контурів дорівнюють нулю.

Матриця з'єднань та допоміжні матриці гілок та вузлів для прикладу, що розглядається, приведені на рис. 4. Ввімкнення однофазної зварювальної машини додає два вузла у матрицю з єднань, двох і трьохфазних – по три вузла. Для однофазної машини приєднується, починаючи з наступних за останніми рядка і стовпця, завжди той самий блок:

1	0	-1
0	1	1

Для трьохфазних машин приєднується блок:

1	0	0	-1	0	1
0	1	0	1	-1	0
0	0	1	0	1	-1

Для двохфазних машин блок, що приєднується, можна отримати з блоку для трьохфазних машин шляхом вилучення стовпців, що відповідають відсутній фазі (виділені сірим кольором):

Фази, до яких підключена двохфазна зварювальна машина	«АВ.ВС»	«ВС.СА»	«СА.АВ»
Блок у матриці з єднань	1 0 0 -1 0 1 0 1 0 1 -1 0 0 0 1 0 1 -1	1 0 0 -1 0 1 0 1 0 1 -1 0 0 0 1 0 1 -1	1 0 0 -1 0 1 0 1 0 1 -1 0 0 0 1 0 1 -1

Для завершення формування матриці з'єднань для всіх гілок фаз, за виключенням тих, що передують першій від джерела живлення машини, необхідно знайти найближчий вузол з тим же кодом, що і гілка і в матриці з'єднань, і на перетині стовпця з інформацією про гілку і рядка з найближчим вузлом ввести значення «-1». Всі інші елементи матриці з'єднань дорівнюють нулю.

Вектор джерел струму формується з нульових елементів. В векторі ЕРС три елементи дорівнюють ЕРС джерела живлення, інші – нулю. Формування цього вектора ведеться одночасно з формуванням інших матриць при почерговому (за зростанням відстані від джерела живлення) розгляді ввімкнених зварювальних машин.

Після додавання інформації про МТКЗ у матрицю з'єднань, контурів та допоміжні матриці V, UZ, K, для всіх гілок, що були додані при розгляді чергової зварювальної машини і належать фазам шинопроводу, в матриці UZ виконується пошук всіх вузлів, що належать тим же фазам, що і гілки. Якщо вузлів, що належать фазі, поки немає, ця гілка є першою від джерела живлення і елементу вектора ЕРС, розташованому в тому ж рядку, що і гілка в матриці V, присвоюється значення ЕРС відповідної фази.

Формування вектора опорів також ведеться разом з іншими матрицями. Опір перших від джерела живлення гілок, що належать фазам мережі, розраховуємо

$$z_{\text{фl}} = z_0 \cdot l_1 + z_{\text{т}},$$

де z_0 - повний питомий опір шинопровода; l_1 - відстань від джерела живлення до першої МТКЗ; $z_{\text{т}}$ - повний опір трансформатора, приведений до напруги 0,38 кВ.

Опори наступних гілок, що відповідають ділянкам фаз шинопровода, розташованими між точками підключення зварювальних машин, визначаємо:

$$z_{\text{фн}} = z_0(l_i - l_{i-1}),$$

де l_i - відстань від джерела живлення до зварювальної машини, що розглядається; l_{i-1} - відстань від джерела живлення до попередньої зварювальної машини, підключеної до тієї ж фази.

Опори гілок, що відповідають фазам зварювальних машин, розраховуються за виразами (1).

Після закінчення розгляду всіх зварювальних машин, за вектором опорів формується діагональна матриця опорів Z.

Таким чином, розрахункова схема для ввімкнених m_1 однофазних, m_2 двохфазних і m_3 трьохфазних зварювальних машин має $q_{\text{н}} = 2m_1 + 3(m_2 + m_3)$ незалежних вузлів; $p = 3m_1 + 5m_2 + 6m_3$ гілок; $n = m_1 + 2m_2 + 3m_3$ незалежних контурів.

Струми і напруги гілок розраховуються за законами Ома і Кірхгофа шляхом розв'язання системи $2p$ лінійних рівнянь (у блочному матричному вигляді):

$$\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & \Pi \\ \Gamma_t & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{U} \\ \vec{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{E} \\ \vec{J} \\ 0 \end{bmatrix},$$

де Π - матриця з'єднань; Γ_t - транспонована матриця контурів; $\vec{U}$, $\vec{I}$ - вектори напруг і струмів гілок; $\vec{E}$, $\vec{J}$ - вектори ЕРС і джерел струму.

Розроблений алгоритм і програма є першим етапом і важливою складовою рішення задачі щодо визначення розрахункових значень пікових струмів і втрат напруги в мережі живлення МТКЗ. Алгоритм призначений для нерозгалуженого шинопроводу, але на його основі досить легко побудувати алгоритм розрахунку як для розгалуженого шинопроводу, так і для мережі з двостороннім живленням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин. – М.: Энергоатомиздат, 1985.- 192 с.

2. Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. Тяжпромэлектропроект, 1976, № 3.–С. 3-9.

Надійшла до редколегії

Рецензент: Е.Г.Курінний

Н.Н. ПОГРЕБНЯК, В.В. МУХИН
Донецкий национальный технический университет

N. POGREBNYAK, V. MUCHIN
Donetsk National Technical University

Расчет токов и напряжений в сети электроснабжения группы машин точечной контактной сварки. Предложен универсальный алгоритм расчета токов и напряжений в электрической сети, питающей группу машин точечной контактной сварки, при любой комбинации любого количества включенных сварочных машин с различным числом фаз. Алгоритм может быть применен для определения максимальных расчетных значений пиковых токов и потерь напряжения в сети электроснабжения группы машин точечной контактной сварки.

Пиковый ток, потеря напряжения, электрическая сеть, машина точечной контактной сварки

Current and voltage calculation in electric network of power supply of group of spot-welding machines. Universal algorithm of current and voltage calculation in electric network of power supply of arbitrary combination of switched-on spot-welding machines of group is proposed. The algorithm can be applied for peak current and voltage loss maximal design value calculation in electric network of power supply of group of spot-welding machines.

Peak current, voltage loss, electric network, spot-welding machine