

5. Burbelo M.J., Hadaj A.V., Stepura O.V. Vyznachennia pulsuiuchoi potuzhnosti v nesymetrychnykh nesynusoidnykh rezhymakh elektrychnykh merezh [Determination of the oscillating power in asymmetrical non-sinusoidal modes of electric networks]. *Tehnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2019, no. 1, pp. 42-49. (Ukr.)
6. Sokol E.I., Sirotin Ju.A., Grib O.G. *Uchet i kompensaciia reaktivnoi moshhnosti pri nesimetrychnykh rezhimakh raboty sistem elektrosnabzheniia* [Account and compensation of reactive power in asymmetrical modes of operation of power supply systems]. Khar'kov, FOP Panov A.N. Publ., 2017. 290 p. (Rus.)
7. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. IEEE Press, Wiley-Interscience Publ., 2007. 379 p.
8. Burbelo M.J., Melnychuk S.M. Vyznachennja potuzhnostej za nesymetrychnykh rezhymiv tryfaznykh merezh iz zazemlenoju nejtrallju [Determination powers at unsymmetrical modes of three-phase networks with grounded neutral]. *Tehnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2015, no. 4, pp. 71-75. (Ukr.)
9. Burlaka V.V., Podnebenna S.K., Gulakov S.V. *Suchasni sylovi aktyvni fil'try ta impul'sni dzhherela zhvyleniia z korektsiyeyu koefitsiyenta potuzhnosti: monografii* [Modern power active filters and pulsed power supplies with power factor correction: monograph]. Mariupol, PSTU Publ., 2015. 196 p. (Ukr.)

Рецензент: В.М. Кутін
д-р техн. наук, проф., ВНТУ

Стаття надійшла 08.02.2019

УДК 621.791.03, 621.314.2, 621.316.727

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181483

© Поднебenna С.К.¹, Бурлака В.В.², Гулаков С.В.³

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСУ МАШИН КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті досліджено роботу комплексу однофазних машин контактного зварювання з боку їх впливу на симетрію і коливання напруги живлення, особливо за умов «слабкої» мережі. Запропоновано метод зниження негативного впливу комплексу машин контактного зварювання на симетрію і коливання напруги мережі за рахунок встановлення технічних засобів вибору пари фаз, від яких живитиметься кожна контактна машина, та застосування централізованого керування їх системами управління. При цьому забезпечується розподіл навантаження по фазах, максимально наближений до симетричного, а вибір пари фаз для живлення кожної контактної машини комплексу здійснюється безпосередньо перед початком циклу зварювання (при нульовому струмі), що дає змогу значно підвищити строк служби комутаційної апаратури. Результати моделювання типового комплексу машин контактного зварювання з живленням від «слабкої» мережі (потужність машин становить близько 5% потужності КЗ мережі) показали, що запропонований підхід дає змогу зменшити коефіцієнт несиметрії напруги більш ніж в 2 рази.

Ключові слова: машина контактного зварювання, джерело живлення, несиметричне навантаження, пристрій синхронізації, коефіцієнт несиметрії.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, podsvet@gmail.com

² д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, vburlaka@rambler.ru

³ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, segul@ukr.net

Поднебенная С.К., Бурлака В.В., Гулаков С.В. Исследование комплекса машин контактной сварки при помощи имитационного моделирования. В статье исследована работа комплекса однофазных машин контактной сварки со стороны их влияния на симметрию и колебания напряжения питания, особенно в условиях «слабой» сети. Предложен метод снижения негативного воздействия комплекса машин контактной сварки на симметрию и колебания напряжения за счет установки технических средств выбора пары фаз, от которых питается каждая контактная машина, и применение централизованного контроля их систем управления. При этом обеспечивается распределение нагрузки по фазам, максимально приближенное к симметричному, а выбор пары фаз для питания каждой контактной машины комплекса осуществляется непосредственно перед началом цикла сварки (при нулевом токе), что позволяет значительно повысить срок службы коммутационной аппаратуры. Результаты моделирования типового комплекса машин контактной сварки с питанием от «слабой» сети (мощность машин составляет около 5% мощности КЗ сети) показали, что предложенный подход позволяет уменьшить коэффициент несимметрии напряжения более чем в 2 раза.

Ключевые слова: машина контактной сварки, источник питания, несимметричная нагрузка, устройство синхронизации, коэффициент несимметрии.

S.K. Podnebenna, V.V. Burlaka, S.V. Gulakov. Investigation of complex of resistance welding machines by means of simulation modeling. In the article, the operation of a electrotechnical complex of single-phase resistance welding machines from the point of view of their influence on the symmetry and fluctuations of the grid voltage, especially in conditions of a «weak» grid, is investigated. Uneven distribution of resistance welding machines across the phases of the power supply grid, the random nature of their turn-on instants and the non-stationary mode of operation lead to the appearance of voltage unbalance. The deterioration of the quality of the supply voltage, in turn, affects the quality of welded joints. For example, the 15% voltage sag leads to 100% bad quality welds, furthermore, for corrosion-resistant steels, a 10% voltage sag will lead to 100% bad welds. Thus, the solution of the problem of ensuring electromagnetic compatibility of welding equipment with the electric grid is an urgent scientific and technical problem. A method is proposed for reducing the negative impact of an electrotechnical complex of resistance welding machines on symmetry and voltage fluctuations by installing technical means for selecting the pair of phases that each resistance welding machine is powered by, and by using centralized control of their control systems. This ensures that the load distribution between phases of the supply grid is as close as possible to the balanced one, and the choice of a pair of phases for powering each resistance welding machine of the electrotechnical complex is done immediately before the start of the welding cycle (while the supply current of the machine is close to zero). This can significantly increase the service life of switching equipment. The results of modeling a typical set of resistance welding machines powered by a «weak» supply grid (the machines total rated power is about 5% of the short circuit power) showed that the proposed approach allows for reducing the voltage unbalance coefficient by a factor of more than 2.

Keywords: resistance welding machine, power supply, unbalanced load, synchronization device, unbalance coefficient.

Постановка проблеми. Джерела живлення машин контактного зварювання (МКЗ) є нелінійними споживачами, що чинять негативний вплив на якість електроенергії мережі. Так, імпульсний характер графіків навантаження таких машин може привести до появи провалів/відхилень/коливань напруги [1-3]. Наявність напівпровідникових елементів в системах живлення МКЗ випрямленим струмом або їх застосування для управління режимом роботи МКЗ при живленні змінним струмом при достатній встановленій потужності може стати причиною спотворення синусоїдності кривої напруги живлення. Нерівномірний розподіл МКЗ по фазах мережі живлення, випадковий характер їх включення і нестационарний режим роботи призводять до появи несиметрії напруги. Погіршення якості напруги живлення, в свою чергу, позна-

часться на якості зварювання, причому найбільшу значимість має відхилення напруги, яке при перевищенні 15% призводить до 100% браку (для корозійностійких сталей до 100% браку призводить відхилення напруги на величину більше 10%) [3]. Таким чином, вирішення проблеми забезпечення електромагнітної сумісності зварювального обладнання з електричною мережею є актуальною науково-технічною проблемою [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблеми забезпечення симетричного споживання струму машинами контактного зварювання присвячені роботи багатьох як вітчизняних, так і зарубіжних вчених. В роботі [4] розглянуті підходи до розробки джерел живлення, що б забезпечували квазісиметричне споживання струмів; в роботах [1, 5, 6] пропонується розробка джерел живлення з корекцією коефіцієнта потужності. Роботи зарубіжних вчених [7, 8], що стосуються машин контактного зварювання, в основному, присвячені розробці джерел живлення, оснований на принципі подвійного перетворення.

Згідно з [2] для підвищення показників якості електроенергії в мережах, що живлять установки контактного зварювання, рекомендується застосовувати автоматичне блокування зварювальних машин, які одночасно включаються (режим «очікування»). Цей принцип широко використовується в автоматичних лініях, і може бути також виконане і для ділянок з технологічно не пов'язаними установками. У таких випадках схема блокування забезпечує обмеження максимальної кількості машин, які одночасно включаються, із загального числа найпотужніших машин даної ділянки. Це дозволяє збільшити завантаження силових трансформаторів і знизити відхилення і коливання напруги при тому ж числі підключених машин. У деяких випадках таке блокування може призводити до зниження продуктивності [2].

Мета статті – розробити підхід до підвищення енергоефективності комплексу МКЗ та дослідити його ефективність за допомогою імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Один з підходів до вирішення проблеми забезпечення симетричного споживання струмів джерел живлення машин контактного зварювання полягає в застосуванні пристрою синхронізації (ПС), який забезпечує керування комплексом МКЗ шляхом включення машин в найменш завантажені фази мережі живлення в режимі реального часу [3]. Схема підключення однієї такої машини до електричної мережі наведена на рис. 1. Схема підключення комплексу машин з ПС наведена на рис. 2. Вхідними сигналами для ПС є фазні напруги та струми у нерозгалуженій частині схеми – вторинні струми трансформатора Т.

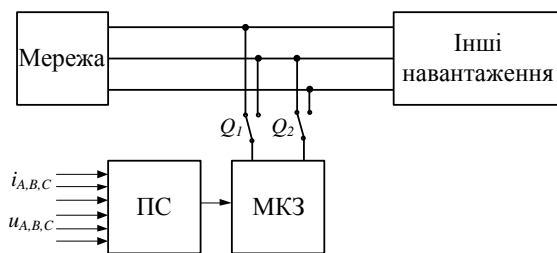


Рис. 1 – Схема підключення МКЗ до електричної мережі

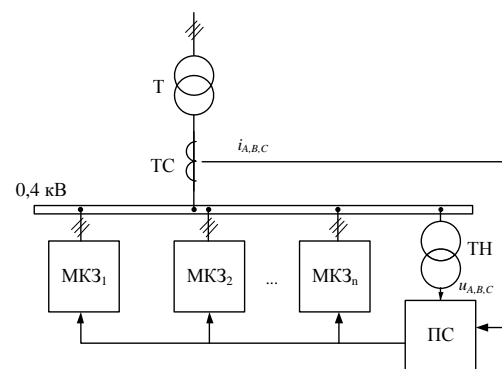


Рис. 2 – Схема комплексу МКЗ з ПС, що живиться від однієї шини підстанції

Алгоритм пошуку найменш завантажених фаз полягає у наступному: на початку кожного зварювального циклу в автоматичному режимі відбувається порівняння лінійних напруг та струмів. Під час роботи МКЗ перемикання між фазами не відбувається через можливість появи коливань. Найбільша лінійна напруга має відповідати найменшому струму, що споживається по відповідній лінії. Перемикання ключів вибору фаз має відбуватися в моменти часу безпосередньо перед початком зварювального циклу, при нульовому струмі. Це дасть можливість забезпечити мінімальні втрати в комутаційній апаратурі. В якості комутаторів можуть виступати електромеханічні контактори, які розраховані на велику кількість циклів перемикання (наприклад, контактор АВВ АF 80-30-00-13 має механічну зносостійкість до 10^7 перемикань).

Перевірка запропонованої системи управління комплексом МКЗ виконана за допомогою імітаційного моделювання у пакеті Matlab Simulink.

Для дослідження роботи комплексу МКЗ створені імітаційні моделі:

- при розподілі зварювальних машин по фазам таким чином, щоб забезпечити рівномірне навантаження усіх фаз живлячої мережі (рис. 3). При цьому при встановленні МКЗ з коефіцієнтами включення, що не суттєво відрізняються між собою, по фазам проводиться розподіл пікової потужності. Нерівномірність навантаження фаз не перевищує 15%;
- при включенні однофазних МКЗ до мережі через пристрої синхронізації (рис. 4).

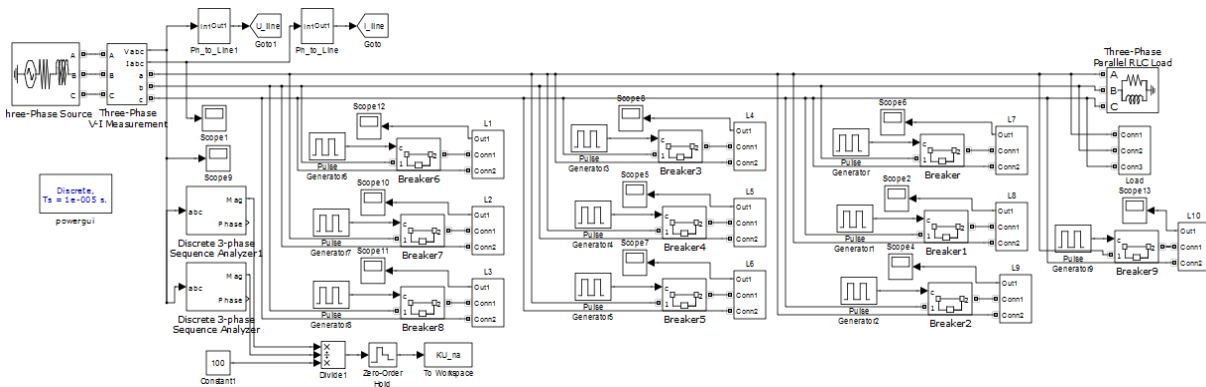


Рис. 3 – Модель комплексу МКЗ з рівномірним розподілом по фазах мережі

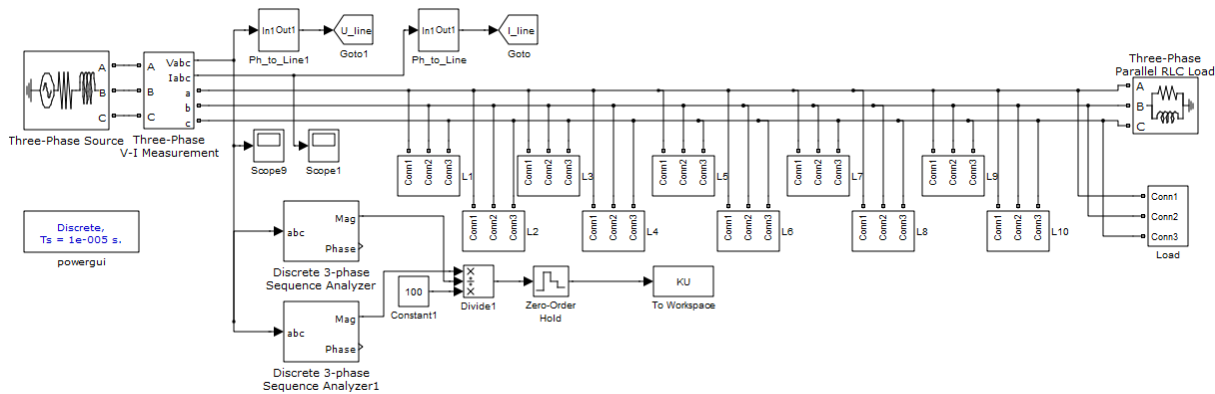


Рис. 4 – Модель комплексу МКЗ при підключенні їх до мережі через ПС

Потужності, тривалості зварювання, коефіцієнти включення та лінійні напруги, на які включені відповідні МКЗ, наведені у таблиці. Потужність короткого замикання складає 3 МВА, тобто моделюється т. зв. «слабка» мережа, де проблеми несиметрії постають досить гостро.

Таблиця

Вихідні дані моделі з рівномірним розподілом по фазах

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Load	RLC
S_s , кВА	12	15	20	30	20	24	15	40	24	20	30	112
$t_{в, c}$	0,4	0,7	0,5	0,62	0,3	0,36	0,6	0,74	0,8	0,46		
K_B	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	0,2	0,5	1	1
Фази	BC	AB	BC	CA	AB	AB	AB	BC	CA	CA		

Потужності та часові характеристики роботи комплексу МКЗ, які підключені до мережі з використанням пристроїв синхронізації, аналогічні наведеним у таблиці. Кожна МКЗ підключається до трьох фаз мережі за схемою, наведеною на рис. 1. Реалізація цієї схеми у Matlab S-

імпульс наведена на рис. 5. Через те, що комутації відбуваються при нульових струмі та напрузі, в якості ключів для моделювання використані ідеальні ключі «Ideal Switch». Вибір потрібної фази відбувається у блоці «Matlab Fun». Вхідними сигналами для нього служать лінійні струми та напруги. Розрахунок обраної пари фаз, на які включається машина, відбувається перед вмиканням МКЗ.

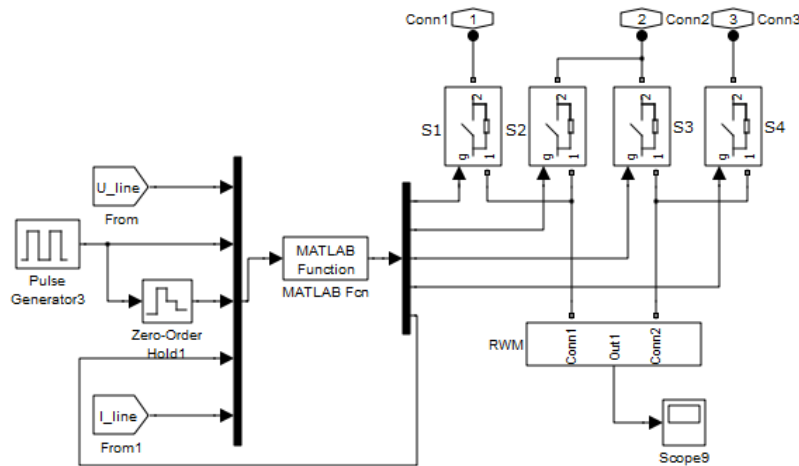


Рис. 5 – Підсистема L_i

Модель однофазної МКЗ наведена на рис. 6. Для управління кутом відкриття тиристорів використовується блок CU, підсистема якого наведена на рис. 7 та представляє собою синхронізований з напругою генератор керуючих імпульсів, що подаються на керуючі електроди зустрічно-паралельно включених тиристорів.

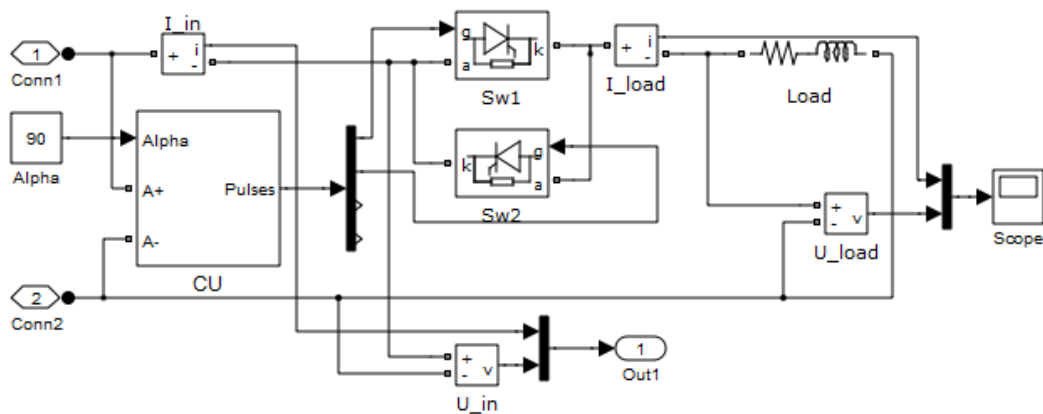


Рис. 6 – Модель однофазної тиристорної МКЗ

Для аналізу процесів, що протікають при роботі комплексу МКЗ, використана методика вимірювання показників несиметрії напруг, згідно стандарту [9].

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} для міжфазних напруг здійснюють згідно з [9]. Для кожного i -го спостереження за період часу, рівний 24 години, вимірюють одночасно діючі значення міжфазних напруг по основній частоті $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$. Діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти, згідно зі стандартом, обчислюють за наступним виразом:

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3}U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]} \quad (1)$$

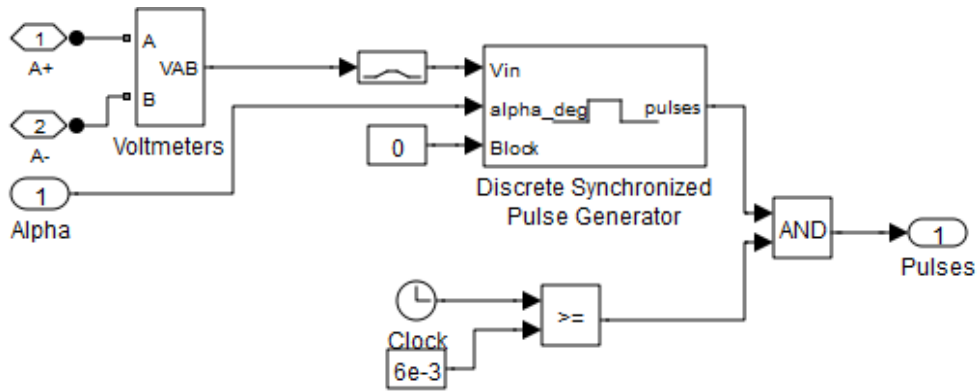


Рис. 7 – Підсистема CU

Згідно зі стандартом, дозволяється розраховувати діюче значення напруги зворотної послідовності за методом симетричних складових. Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю розраховується як частка від ділення:

$$K_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

а потім відбувається усереднення N спостережень K_{2U_i} на інтервалі часу T_{ns} , який дорівнює 3 с, а кількість спостережень не може бути меншою, ніж 9:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2U_i}^2}{N}} . \quad (3)$$

Для розрахунку коефіцієнту несиметрії по зворотній послідовності діючі значення напруг прямої та зворотної послідовностей обчислюються згідно з методом симетричних складових. Для цього в моделях використовуються блоки «Discrete 3-phase Sequence Analyzer», підсистема якого наведена на рис. 8.

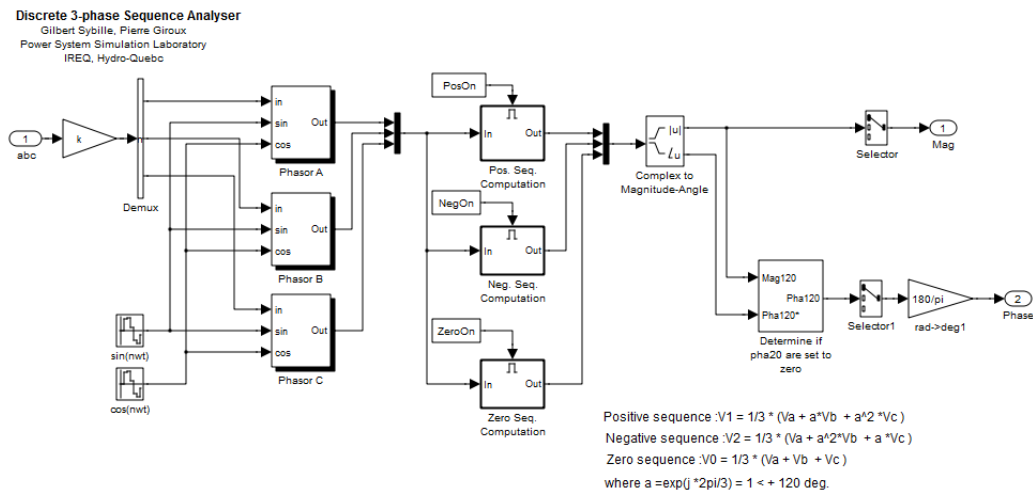


Рис. 8 – Підсистема обчислення напруги прямої та зворотної послідовностей

Дискретизація отриманого коефіцієнту несиметрії відбувається за допомогою блоку «Zero-Order Hold», час дискретизації дорівнює 3/9 с. Усереднення отриманого результату відбувається на інтервалі 3 с. Загальна тривалість моделювання складає 30 с. Результати отриманих коефіцієнтів несиметрії по зворотній послідовності наведені на рис. 9, а, б.

Згідно стандарту, якість електроенергії по відхиленню напруги в точці загального приєднання до електричної мережі вважають такою, що відповідає вимогам стандарту, якщо всі значення відхилення напруги, які виміряні за кожен хвилину впродовж 24 годин, знаходяться в

інтервалі, що обмежується гранично допустимими значеннями, а не менш 95% виміряних за той же період часу значень знаходяться в інтервалі, що обмежений нормально допустимими значеннями [9]. Додатково допустимо визначати відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю часу виходу виміряних значень за нормально та гранично допустимі значення. При цьому якість електроенергії за сталим відхиленням напруги вважають такою, що відповідає вимогам стандарту [9], якщо сумарна тривалість виходу за межі нормально допустимих значень складає не більше 5% від сталого періоду часу, а за гранично допустимі значення – 0% від цього періоду часу [9].

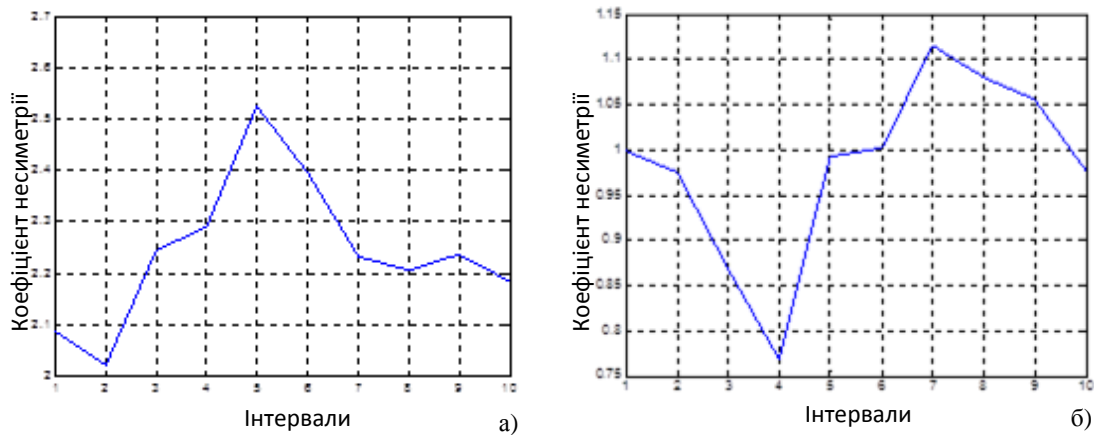


Рис. 9 – Зміна коефіцієнтів несиметрії по зворотній послідовності при: а – роботі комплексу з рівномірним розподілом по фазах мережі; б – роботі комплексу через ПС

З діаграм (рис. 9) видно, що на інтервалі часу, який дорівнює 30 с, сумарна тривалість виходу за межі нормально допустимих значень розрахованих коефіцієнтів несиметрії при роботі комплексу МКЗ з рівномірним розподілом по фазах складає 100%, в той час як цей показник, розрахований при роботі комплексу машин, оснащених пристроями синхронізації, дорівнює нулю. Для того, щоб дістатися висновку про відповідність розрахованих показників нормам стандарту, треба апроксимувати отримані залежності на інтервалі часу, що дорівнює 24 годинам. Втім, з діаграм (рис. 9) видно, що при роботі комплексу машин, що рівномірно розподілені по фазах, спостерігається тенденція до перевищення нормально допустимих показників, в той час, як при роботі машин з пристроями синхронізації розрахунковий коефіцієнт несиметрії знаходиться в нормальному діапазоні.

Висновки

Розроблено підхід до підвищення енергоефективності комплексу машин контактного зварювання, що полягає у використанні пристроїв синхронізації, які дозволяють відстежувати найменш завантажені фази мережі та підключати до них однофазні машини контактного зварювання. Запропонований підхід досліджено за допомогою імітаційного моделювання. Застосування запропонованого підходу до управління комплексом машин контактного зварювання за рахунок включення машин в найменш завантажені фази мережі в режимі реального часу дозволяє зменшити несиметрію при роботі комплексу машин та забезпечити відповідність вимогам діючих стандартів.

Список використаних джерел:

1. Kuzin D. Power Quality Improvement in Single-phase Power Supplies for Resistance Welding / D. Kuzin, T. Khyzhniak, O. Bondarenko // International Conference on Electronics and Information Technology (EIT). – 2016. – Pp. 1-5. – Mode of access: DOI: 10.1109/ICEAIT.2016.7500985.
2. Рекомендации по расчету электрических нагрузок и выбору сетей, питающих установки для контактной сварки М788-917. – М. : ВНИПИ ТПЭП, ГО «Электропроект», 1983. – 102 с.
3. Поднебенная С.К. Оптимизация работы комплекса машин контактной сварки / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака, С.В. Гулаков // Сварка и родственные технологии: перспективы раз-

вития : материалы IV международной научно-технической конференции (04-07 октября 2016; Краматорск) / под общ. ред. д-ра техн. наук Н. А. Макаренко. – Краматорск : ДГМА, 2016. – С. 102.

4. Лебедев В.К. Система питания для машин контактной сварки с транзисторным инвертором / В.К. Лебедев, А.А. Письменный // Автоматическая сварка. – 2003. – № 2. – С. 11-13.
5. Рымар С.В. Влияние однофазных источников питания сварочной дуги на электрическую сеть / С.В. Рымар, А.М. Жерносеков, В.Н. Сидоренко // Автоматическая сварка. – 2011. – № 12. – С. 9-15.
6. Поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення для систем контактної зварювання / П.С. Сафронов [та ін.] // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 89-91.
7. Wagner M., Kolb S. Efficiency Improvements for High Frequency Resistance Spot Welding // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). – 2013. – Pp. 1-9. – Mode of access: DOI: 10.1109/EPE.2013.6634720.
8. Saleem J. Power Electronics for Resistance Spot Welding Equipment / J. Saleem // Mid Sweden University Licentiate Thesis. – Sundsvall. – 2012. – 42 p.
9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999-01-01. – К. : Госстандарт Украины. – 1999. – 32 с.

References:

1. Kuzin D., Khyzhniak T., Bondarenko O. Power Quality Improvement in Single-phase Power Supplies for Resistance Welding. International Conference on Electronics and Information Technology (EIT), 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICEAIT.2016.7500985.
2. Rekomendatsii po raschetu elektricheskikh nagruzok i vyboru setei, pitaiushchikh ustanovki dlia kontaktnoi svarki M788-917 [Recommendations for the calculation of electrical loads and the selection of networks supplying resistance welding systems M788-917]. Moscow, VNIPI TPEP, GO «Elektroproekt» Publ., 1983. 102 p. (Rus.)
3. Podnebennaia S.K., Burlaka V.V., Gulakov S.V. Optimizatsiia raboty kompleksa mashin kontaktnoi svarki. Materialy 4th Mezhd. nauch.-tekhn. konf. «Svarka i rodstvennye tekhnologii: perspektivy razvitiia» [Optimization of the work of a complex of resistance welding machines. Proceedings of 4th Int. Sci.-Tech. Conf. «Welding and related technologies: development prospects»]. Kramatorsk, 2016, p. 102. (Rus.)
4. Lebedev V.K., Pis'mennyi A.A. Sistema pitaniia dlia mashin kontaktnoi svarki s tranzistornym invertorom [Power system for resistance welding machines with transistor inverter]. Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding, 2003, no. 2, pp. 11-13. (Rus.)
5. Rymar S.V., Zhernosekov A.M., Sidorets V.N. Vliianie odnofaznykh istochnikov pitaniia svarochnoi dugi na elektricheskuiu set' [The effect of single-phase welding arc power sources on the electrical network]. Avtomaticheskaiia svarka – Automatic Welding, 2011, no. 12, pp. 9-15. (Rus.)
6. Safronov P.S., Bondarenko Iu.V., Bondarenko O.F., Sidorets' V.M., Kucherenko D.V. Polipsheniia elektromagnitnoi sumisnosti dzherel zhivlenniia dlia sistem kontaktного zvariuvannia [Improvement of electromagnetic compatibility of power supplies for contact welding systems]. Tekhnichna elektrodinamika – Technical Electrodynamics, 2014, no. 5, pp. 89-91. (Ukr.)
7. Wagner M., Kolb S. Efficiency Improvements for High Frequency Resistance Spot Welding. 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013, pp. 1-9. doi: 10.1109/EPE.2013.6634720.
8. Saleem J. Power Electronics for Resistance Spot Welding Equipment. Mid Sweden University Licentiate Thesis, Sundsvall, 2012. 42 p.
9. GOST 13109-97. Elektricheskaiia energiia. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia [State Standart 13109-97. Electric Energy. Hardware Compatibility. Quality standards for electric energy in general power supply systems]. Kiev, Gosstandart Ukrainy Publ., 1999. 32 p.

Рецензент: С.В. Щетинін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.02.2019