

ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ПУЛЬСУЮЧИМ ХАРАКТЕРОМ НАВАНТАЖЕННЯ НА МЕРЕЖУ ЖИВЛЕННЯ

Вступ. Робота великої частини електроприводів (ЕП) супроводжується періодичними процесами, зумовленими як циклічним характером прикладання навантаження, так і тахограми руху (розгін, гальмування, реверс). Для електричної мережі живлення такі ЕП є складними споживачами через пульсації активної і реактивної потужності, а також у випадку регульованих ЕП, які, як правило, є нелінійними навантаженнями через наявність вищих гармонік струмів споживання. Енергетична ефективність компенсації пульсацій активної та реактивної потужностей електроспоживачів показана в низці досліджень [1-3]. Для підвищення електромагнітної сумісності (ЕМС) нелінійних споживачів відповідно до введених останнім часом стандартів [4,5] пропонується велика кількість силових активних фільтрів (САФ) та активних випрямлячів (АВ) [6-8]. У випадку регульованих ЕП з ланкою постійного струму, циклічні процеси в яких включають періоди гальмування привідного механізму, постає ще проблема енергії гальмування. Тут можливі три варіанти її передачі: 1) додатковому маховикові, закріпленому на валу привідного двигуна, з метою виключення її передачі в ланку постійного струму [9]; 2) в баластні опори, що підключені через регулюючі чопери до ланки постійного струму; 3) в мережу споживання через, наприклад, АВ з двонаправленою передачею енергії. Для кожного з цих варіантів характерні свої переваги та недоліки: для 1-го – простота реалізації, проте низька надійність та коливання частоти обертання двигуна, що не завжди допускається технологічним процесом; для 2-го – втрати енергії гальмування; для 3-го – вирішення проблеми ЕМС, але додаткові втрати в мережі через збільшення пульсацій активної потужності.

Вищевказані проблеми ЕМС та енергетичної ефективності ЕП з пульсуючим характером навантаження особливо загострюються у випадках живлення ЕП від малопотужних та локальних мереж.

Постановка задачі дослідження. Останні дослідження в галузі електроенергетики [10,11] показують, що цілу низку проблем, пов'язаних з ЕМС та енергетичною ефективністю споживачів, можна вирішити, застосувавши електричні нагромаджувачі енергії (НЕ).

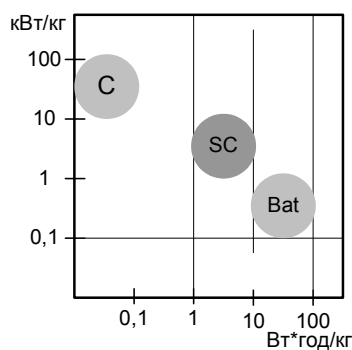


Рис. 1. Питома енергія та потужність електричних НЕ

З появою суперконденсаторів (СК), що характеризуються ультрависокою ємністю, швидкими та високоефективними циклами заряду – розряду, високим показником питомої потужності, перспективним є використання їх як проміжних електричних НЕ. Порівняння СК з традиційним конденсатором та електрохімічною батареєю (рис. 1) показує, що питома енергія СК у 100 разів вища, ніж традиційного конденсатора, питома потужність – у 10 разів вища, ніж батареї. Час заряду – розряду СК становить від долей секунд до декількох годин, кількість робочих циклів заряду – розряду досягає 1 млн [12].

Використання таких електричних НЕ в ЕП з циклічним характером навантаження дає змогу комплексно вирішити низку електроенергетичних задач: компенсація коливань активної потужності, в тому числі й потужності гальмування, і тим самим спрощення завдання вирішення проблеми ЕМС (використання пасивних фільтрів) та підвищення енергетичної ефективності системи електромережа – ЕП; можливість роботи ЕП з потрібною динамікою при живленні від локальних мереж сумірної потужності.

Метою цієї роботи є дослідження на комп'ютерних моделях закономірностей роботи та енергетичних показників ЕП з циклічним характером навантаження та електричним НЕ при живленні від локальних мереж.

Матеріали дослідження. Дослідимо систему регульованого ЕП (рис. 2) у двох конфігураціях: а) традиційний регульований ЕП з передачею електричної енергії гальмування в баластний опір R_f у ланці постійного струму; б) регульований ЕП з DC/DC перетворювачем та батареєю суперконденсаторів SC.

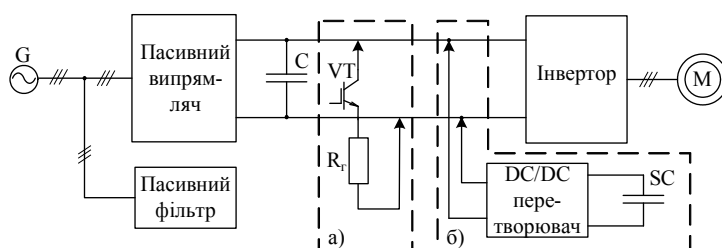


Рис. 2. Система ЕП із засобами покращення його електроенергетичних показників

Методом досліджень є комп'ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

Якщо споживана ЕП електрична потужність $P_n(t)$ (рис. 3) має циклічний характер з періодом повторюваності T , то середнє за цей період значення потужності рівне

$$P_{н.сер} = \frac{1}{T} \int_0^T P_n(t) dt.$$

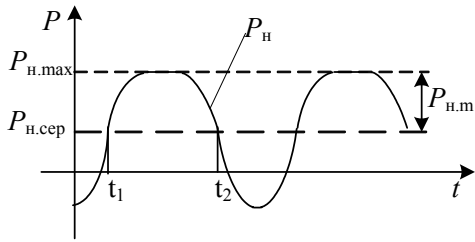


Рис. 3. Форма кривої активної потужності, споживаної ЕП

$$P_n(t) = P_{n,max} \left[1 - \lambda \left(1 - \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right) \right];$$

$$P_n(t) = P_{n,сер} \left[1 + \frac{\lambda}{1-\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right]. \quad (2)$$

Рівняння (2) реалізовані у комп'ютерних моделях як ідеальне джерело потужності, яка споживається чи передається в ланку постійного струму з реальним значенням напруги.

Для оцінки впливу ступеня λ на енергетичні показники системи електрична мережа – ЕП було проведено дві серії експериментів, які відрізняються між собою зафіксованим значенням потужності споживання та типом пасивного фільтра на вході системи ЕП: 1) ЕП із заданою $P_{n,max} = 10$ кВт живиться від локальної трифазної низьковольтної ($U_n = 380$ В) мережі потужністю, що визначається показником $k_M = P_{кз}/P_{n,max} = 8$ (внутрішній фазний опір мережі рівний $r = U_n^2/P_{кз}$ [1,2]); індуктивність фільтрів на вході системи ЕП для зниження коефіцієнта гармонік струму k_T становить 10 мГн; 2) ЕП із заданою $P_{n,сер} = 2$ кВт живиться від такої ж мережі, але з $k_M = P_{кз}/P_{n,сер} = 30$; на вході некерованого випрямляча поставлено L-C фільтр (20 мГн, 4 мкФ), який знижує k_T та повністю компенсує реактивну потужність при постійному електроспоживанні на рівні $P_{n,сер}$.

На рис. 4 наведені результати комп'ютерного симулювання системи за конфігурацією а (рис. 2) у вигляді залежностей наступних енергетичних показників системи від λ : k_T , коефіцієнта зсуву за першою гармонікою струму $\cos\phi$ та інтегрального за час циклу T ККД системи електромережа – ЕП за активною потужністю η .

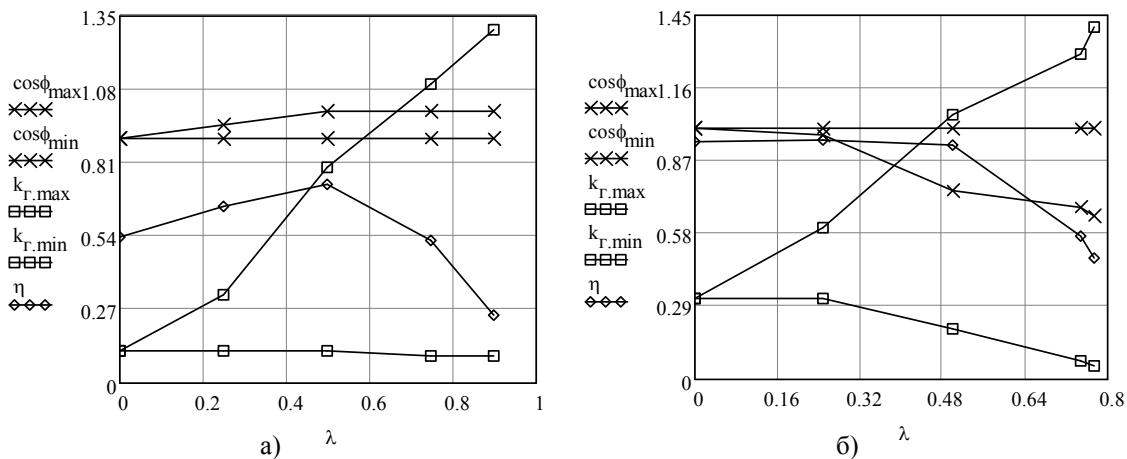


Рис. 4. Результати комп'ютерного симулювання системи за конфігурацією а (рис. 2) для варіантів 1 (а) і 2 (б)

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити низку висновків:

- через пульсуючий характер споживаної потужності забезпечити задані показники ЕМС за допомогою пасивних фільтрів на вході системи ЕП неможливо;
- скидання енергії гальмування ($\lambda > 0,5$) в баластний опір призводить до різкого зниження ККД системи ЕП;
- при живленні від мережі, зорієнтованої на максимальну потужність ЕП (рис. 4,а), за зростання рівня пульсацій потужності ($\lambda < 0,5$) ККД системи дещо зростає, а при живленні від мережі, зорієнтованої на середню потужність ЕП (рис. 4,б), – знижується;
- для варіанту 2 при зростанні λ напруга в ланці постійного струму суттєво знижується (рис. 5) і при $\lambda > 0,775$ падає до нуля через досягнення значенням $P_{n,max} = P_{n,сер}/(1-\lambda) = 8,89$ кВт, що є межею за максимальною споживаною потужністю для системи із заданими параметрами.

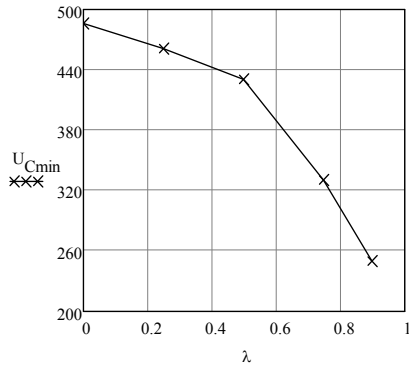


Рис. 5. Залежність мінімальної напруги в ланці постійного струму від λ для варіанту 2

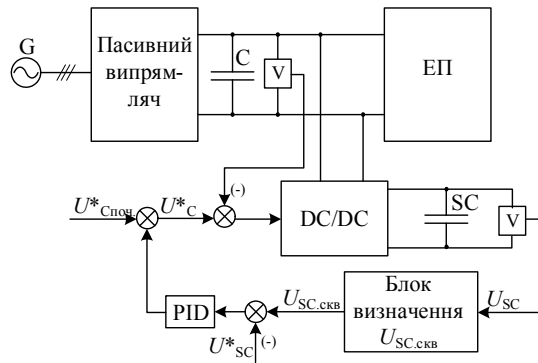


Рис. 6. Функціональна схема системи ЕП з DC/DC перетворювачем та електричним НЕ

Таким чином, традиційна конфігурація а (рис. 2) системи ЕП у випадках пульсуючого характеру потужності споживання супроводжується цілою низкою проблем. Як альтернативу розглянемо перспективну конфігурацію б (рис. 2). Для її роботи необхідно використати двонаправлений підвищувально-понижувальний DC/DC

перетворювач, батарею SC потрібної ємності та розробити відповідну САР напруги U_C в ланці постійного струму (рис. 6).

Для прискорення роботи моделі DC/DC перетворювач змодельований як ідеальний керований перетворювач потужності із ККД $\eta_{\text{п}}$, значення якого задавалося в роботі 0,9.

Потрібна ємність батареї суперконденсаторів визначається з рівняння балансу циркулюючої енергії (1):

$$C_{\text{SC}} = \frac{\Delta W_{\text{ц}}}{\eta_{\text{п}} (U_{\text{SC,max}}^2 - U_{\text{SC,min}}^2)},$$

де $U_{\text{SC,max}}$, $U_{\text{SC,min}}$ – відповідно максимальне та мінімальне задані значення напруги SC.

САР напруги повинна забезпечувати в усталеному режимі таке постійне значення U_C , щоб напруга на батареї SC в процесі коливання потужності, споживаної ЕП, мала постійні крайні значення $U_{\text{SC,min}}$ і $U_{\text{SC,max}}$. Це означатиме, що енергія циркуляції $\Delta W_{\text{ц}}$ повністю забезпечуватиметься SC, а з мережі споживатиметься лише постійна потужність, рівна сумі $P_{\text{н,сеп}}$ та потужності втрат в DC/DC перетворювачі. Напруга завдання U_C^* формується як сума початкової напруги завдання $U_{\text{C,п}}$ та напруги регулювання середньоквадратичного значення напруги батареї суперконденсаторів

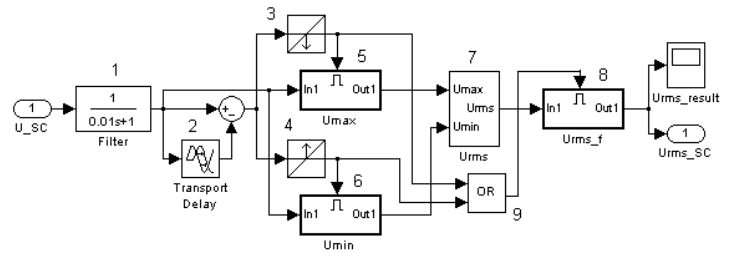


Рис. 7. Комп'ютерна модель блоку визначення $U_{\text{SC,СКВ}}$

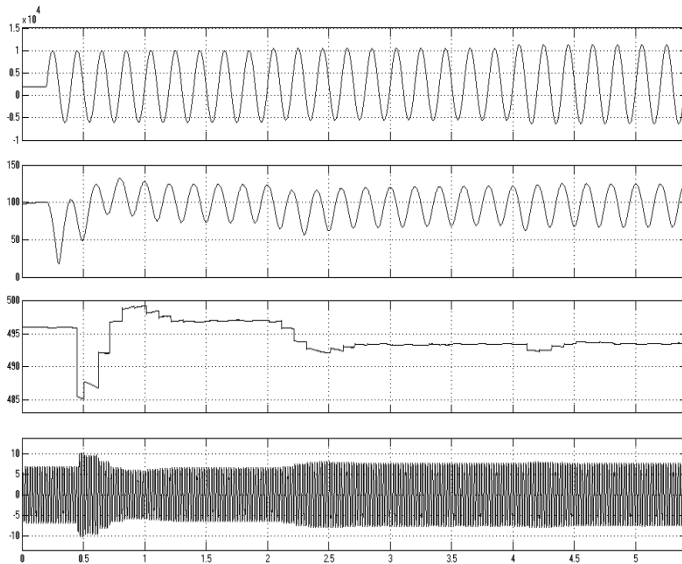


Рис. 8. Осцилограми роботи системи ЕП:

- активної потужності, яка споживається ЕП;
- напруги суперконденсатора;
- напруги в ланці постійного струму;
- фазного струму мережі живлення

З метою зменшення часу моделювання вибраний невеликий період пульсації потужності ($T = 0,2$ с). В момент часу 0,2 с розпочинається пульсація активної потужності ЕП з $\lambda = 0,8$ при $P_{\text{н,max}} = 10$ кВт. У час 2 с відбувається збурення у вигляді збільшення $P_{\text{н,сеп}}$ на 25%, а в час 4 с – у вигляді збільшення амплітуди пульсації потужності на 20%. Осцилограми показують працездатність і добру динаміку САР.

$$U_{\text{SC,СКВ}} = \sqrt{0,5(U_{\text{SC,max}}^2 + U_{\text{SC,min}}^2)}.$$

Остання визначається в блоці, комп'ютерна модель якого показана на рис. 7. За допомогою блоків 2-4 знаходяться моменти досягнення напругою SC максимального та мінімального значень, які запам'ятовуються блоками 5 і 6. Блок 7 визначає середньоквадратичне значення напруги, яке запам'ятовується блоком 8 та дискретно оновлюється на його виході після кожного досягнення значень $U_{\text{SC,min}}$ чи $U_{\text{SC,max}}$. На рис. 8 наведені осцилограми, які ілюструють роботу САР напруги.

Результати двох серій комп'ютерних експериментів з вихідними параметрами, аналогічними конфігурації системи ЕП а, але отримані для системи конфігурації б (рис.2) приведені на рис. 9. Їх аналіз показує, що проектувати живлення електричною енергією системи ЕП з проміжним електричним НЕ необхідно, орієнтуючись на середню споживану потужність, а не на максимальну. При цьому не залежно від ступеня коливань активної потужності λ забезпечуються стабільні та високі енергетичні показники системи електромережа – ЕП.

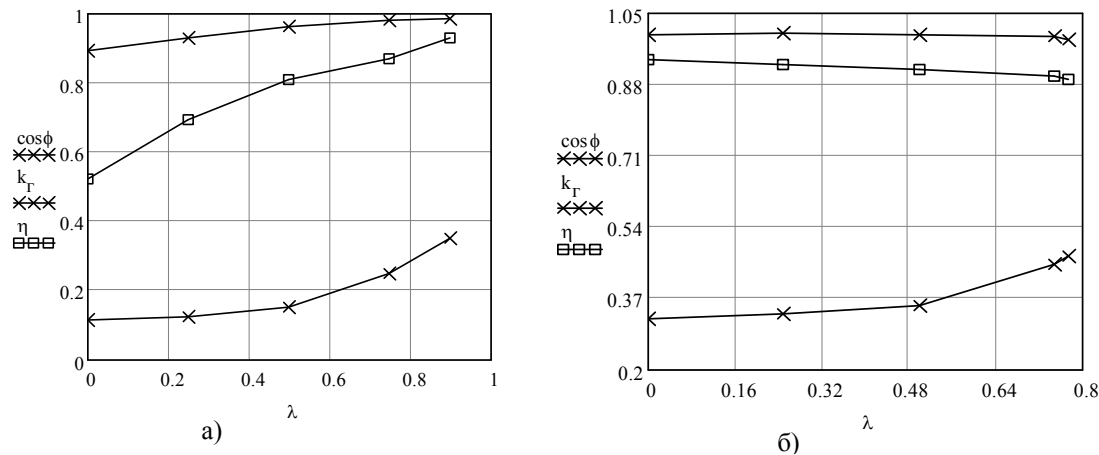


Рис. 9. Результати комп'ютерного симулювання системи електромережа – ЕП за конфігурацією б (рис. 2) для варіантів 1 (а) і 2 (б)

Висновки.

1. Використання проміжного електричного НЕ у вигляді батареї суперконденсаторів дає змогу комплексно забезпечити ЕМС та підвищити енергетичну ефективність ЕП з циклічним характером навантаження.
2. Особливо перспективним є використання електричного НЕ в ЕП з гальмівними режимами, що живляться від електричних мереж сумірної потужності.
3. Стрімкий розвиток технології виробництва суперконденсаторів та їх здешевлення є підставою для економічної доцільності їх застосування як НЕ в ЕП у недалекій перспективі. Цьому сприяє, крім енергетичної ефективності, також вирішення завдання використання енергії гальмування та забезпечення ЕМС простими засобами – пасивним фільтруванням.

Література.

1. Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Ильина О.А., Тугай Д.В. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой // *Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки».* – 2006. – №6. – С. 36-41.
2. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.А., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // *Технічна електродинаміка.* – 2007. – №1. – С. 52-57.
3. Аносов В.Н., Гуревич В.А., Кавешников В.М. Синтез оптимального силового фильтра в системе тягового электропривода // *Электротехника.* – 2003. – №9. – С. 31-34.
4. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2000.
5. Limits for Harmonics Current Emissions (Equipment Input Rated Current Greater than 16 A Per Phase), IEC 61000-3-4 International Standard, 2005.
6. Агунов А.В. Улучшение электромагнитной совместимости в автономных электроэнергетических системах ограниченной мощности методом активной фильтрации напряжения // *Электротехника.* – 2003. – №6. – С.52-56.
7. Routimo M., Salo M., Tussa H. Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2007, vol. 22, no. 2, pp. 636-642.
8. Redriguez J., Dixon J., Espinoza J., Pontt J., Lezana P. PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art // *IEEE Trans. Industrial Electron.* – 2005, vol. 52, no. 1, pp. 5-22.
9. Лозинський А.О., Карлюк Л.Ф., Карлюк Б.Л. Дослідження частотно керованого електропривода зі змінним моментом інерції та навантаження // *Між від. наук.-техн. зб. Націон. Одеськ. ун-ту.* – 2006. – №66. – С. 46-47.
10. Иванов А.М., Иванов С.А. Комбинированные энергоустановки с ИКЭ – основа эффективного использования топливно-энергетических ресурсов XXI века // *Электротехника.* – 2003. – №12. – С. 2-6.
11. Nowak M. Nowe rodzaje baterii elektrochemicznych i superkondensatory – perspektywy zastosowania w energetyce // *X Miedzynar. konf. “Nowoczesne uradzenia zasilajace w energetyce”.* – 2007. – S. 18.1-18.12.
12. Gao L., Dougal R.A., Liu Sh. Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid // *IEEE Trans. Power Electron.* – 2005, vol. 20, no. 1, pp. 236-243.

**INCREASE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND POWER EFFICIENCY
OF ELECTRIC DRIVES WITH PULSATING CHARACTER OF LOAD
ON THE FEED NETWORK**

By the computer design on the concrete examples of electric drives with pulsating character of load on the feed network the problems of their electromagnetic compatibility and power efficiency are analyzed. It is shown that these problems complex decide due to the use of electric store of energy as the battery of supercapacitors.