

УДК 621.316.761.2

Варецький Ю.О.
ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕМС

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРОВИХ РЕАКТОРІВ

© Варецький Ю.О., 2000

Статтю присвячено проблемі вибору параметрів фільтрових реакторів для схем фільтро-компенсуючих кіл, призначених для роботи в системах електропостачання промислових навантажень. Показано, що тут важливе значення мають характеристики перехідних процесів у нормальних експлуатаційних режимах. Дається аналіз перехідних струмів і напруг у характерних режимах з огляду на їх амплітуди та повторюваність, а також порядок врахування цих факторів під час вибору параметрів фільтрових реакторів.

Загальною практикою в проектуванні фільтро-компенсуючих кіл (ФКК) для схем, які призначені для тих чи інших мереж, є використання параметрів усталених режимів, що необхідні для вибору потужностей та параметрів окремих фільтрів. Як свідчить досвід, комутаційні режими у деяких системах електропостачання часто зумовлюють перевантаження фільтрів ФКК чи пробивання ізоляції їх окремих елементів. У зв'язку з цим під час опрацювання схем ФКК особливу увагу потрібно звернути на дію перенапруг та надструмів, які діють на конденсаторні батареї та реактори фільтрів. З огляду на це, крім самих величин перехідних струмів та напруг, важливою є також їх тривалість та частота повторюваності. Як видно з огляду літератури та результатів промислової експлуатації ця частина проблеми вибору розрахункових потужностей фільтрів є особливо гострою для систем електропостачання нелінійних швидкозмінних навантажень [1, 2]. У цій статті на прикладі системи електропостачання дугових сталеплавильних печей (ДСП), яка містить ФКК у складі статичного тиристорного компенсатора (СТК), проаналізовано відповідні експлуатаційні режими і дані рекомендації щодо вибору параметрів фільтрових реакторів з врахуванням особливостей цих режимів.

Під час проектування сухих фільтрових реакторів без магнітного осердя, як правило, мають бути задані такі дані:

- номінальні напруга та частота мережі;
- номінальна індуктивність, допуски її зміни та необхідність регульовальних відгалужень;
- величини усталених значень струмів основної гармоніки та гармоніки настроювання;
- значення струму к.з. реактора;
- величини імпульсних випробувальних напруг для поздовжньої та поперечної ізоляцій;
- добротність фільтра;
- бажані значення розмірів реактора та монтажних конструкцій;

- характеристики навколишнього середовища (закрите/відкрите приміщення, забруднення, сейсмічність тощо).

Типовою специфікацією для фільтрового реактора без магнітного осердя є значення допустимої величини напруги грозового імпульсу $U_{\text{доп}}^{\Gamma}$. Проте, як свідчить досвід, тільки значення допустимої напруги грозового імпульсу не є достатнім для забезпечення бажаних умов експлуатації ізоляції фільтрових реакторів. Перенапруги певної тривалості, які за амплітудами є меншими від допустимого значення, можуть створювати місцеві часткові розряди, що спричиняють прискорене старіння ізоляції. Це може призводити через деякий час до загального перекриття ізоляції від відносно нижчих перенапруг. Подібна картина складається з дією надструмів. Розрахунок теплової та динамічної стійкості фільтрового реактора в процесі дії струму короткого замикання, ще не вирішує проблеми його надійної експлуатації. Часто повторювані надструми спричиняють механічну "втому", що є причиною зменшення часу експлуатації реактора. Як наслідок, фільтрові реактори, котрі експлуатуються в умовах дії часто повторюваних динамічних перенапруг та надструмів, будуть знаходитися під більш напруженим електричним та механічним "тиском", а це потребує відповідної корекції підходів до вибору розрахункових параметрів. Ці параметри, на відміну від традиційної методики, потрібно розраховувати з обов'язковим врахуванням таких характеристик експлуатаційних режимів систем електропостачання, для яких проектується силові фільтри:

- амплітуди часто повторюваних комутаційних перенапруг та надструмів;
- тривалість перехідних процесів часто повторюваних комутаційних режимів;
- частота повторюваності комутаційних режимів.

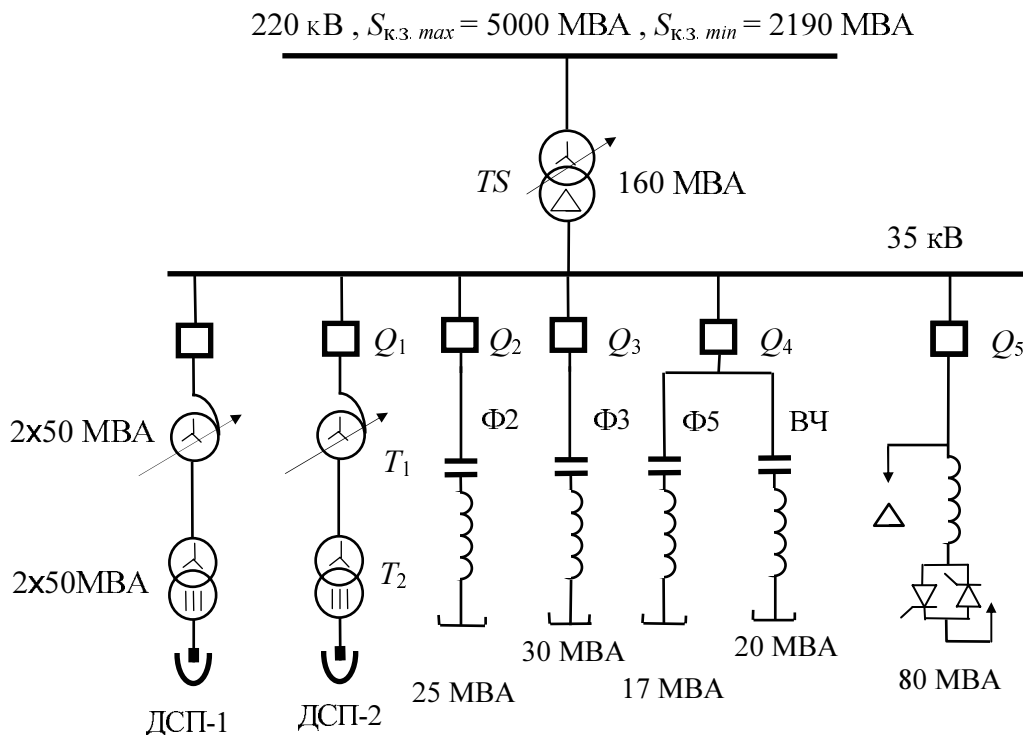


Рис.1. Система електропостачання ДСП.

Здійснені у цьому напрямі експериментальні дослідження описані в працях [3, 4].

Розглянемо вибір фільтрових реакторів на прикладі системи електропостачання, показаної на рис.1.

Експлуатація наведеної системи електропостачання супроводжується певною низкою комутацій обладнання, зумовлених нормальним технологічним процесом приєднаного навантаження та елементів схеми СТК. На відміну від комутацій, спричинених аварійними ситуаціями, комутації цього типу відбуваються набагато частіше. З огляду на повторюваність процесів експлуатаційні режими розглянутої системи електропостачання, що мають визначальний вплив на вибір потужності ФКК, можна охарактеризувати так:

- усталений режим – протягом року;
- увімкнення трансформаторів ДСП – 5–10 тис. у рік;
- увімкнення фільтрів – до 1 тис. у рік;
- вимкнення фільтрів з повторними запалюваннями дуги між контактами вимикачів – до 1 тис. у рік.

Перелічені режими є критичними під час визначення параметрів фільтрових реакторів тому, що дають характерну інформацію про надструми та перенапруги на елементах фільтрів як з огляду на амплітуди, так і їх тривалість. Відповідно до тривалості та повторюваності розглянутих у нашому аналізі експлуатаційних режимів, допустимі еквівалентні розрахункові величини діючих значень напруг та струмів сухих реакторів можна визначати, наприклад, згідно з рекомендаціями [3] за виразами, наведеними у табл.1.

Таблиця 1

Розрахункові величини для фільтрових реакторів

№ п/п	Експлуатаційний режим	Розрахункова величина
1	2	3
1	Усталений	$U_1 = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}$ $I_1 = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$ $I_{к.з.1} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}x_{фр}}$ $U_{доп} \geq U_{доп}^{\Gamma}$
2	Ввімкнення пічного трансформатора	$U_2 = \frac{U_{ампл 2}^{фр}}{1,5\sqrt{2}}$ $I_{к.з.2} = 3 \frac{I_{ампл 2}^{фр}}{\sqrt{2}}$
3	Ввімкнення фільтра	$U_3 = \frac{U_{ампл 3}^{фр}}{2\sqrt{2}}$ $I_{к.з.3} = 2 \frac{I_{ампл 3}^{фр}}{\sqrt{2}}$

Продовження таблиці 1

1	2	3
4	Повторні запалювання дуги між контактами вимикача під час його вимкнення	$I_{к.з.4} = 1,5 \frac{I_{ампл 4}^{фр}}{\sqrt{2}}$ $U_{доп} \geq U_{доп}^Г$ <p>але не менше ніж $U_{ампл 4}^{фр}$</p>

Примітка: $U, I, I_{к.з.}$ – діючі значення; $U_{доп}, U_{ампл}, I_{ампл}$ – амплітудні значення; цифрові індекси у величинах струмів та напруг належать до порядкових номерів режимів.

Розглянемо особливості перелічених комутаційних режимів у розглянутій схемі електропостачання (рис.1) і на прикладі фільтрового реактора фільтра другої гармоніки порівняємо результати вибору його параметрів, отримані, з одного боку, з використанням традиційного підходу, а з іншого – з врахуванням дії перехідних струмів та напруг. Вихідні параметри фільтра за вимогами усталеного режиму:

Параметр фільтра	Значення
Номінальна потужність	25 МВА
Номінальна напруга	38,5 кВ
Номінальний реактанс КБ	82,0 Ом
Номінальний реактанс ФР	22,7 Ом
Відносна частота настроювання фільтра	1,95
Розрахунковий струм другої гармоніки	50 А

Одним з найважчих комутаційних режимів для ФКК у цій системі електропостачання є ввімкнення пічного трансформатора [1–3]. Відомо, що ввімкнення трансформатора супроводжується появою цілого спектра гармонік струму [2], амплітуди яких з плином часу можуть приймати різне значення залежно від умов увімкнення. Одні з них з часом монотонно згасають, а інші – можуть у певні інтервали і наростати. Зокрема, це стосується струмів другої гармоніки. На рис.2 показано для прикладу модельні осцилограми ввімкнення пічного трансформатора у досліджуваній системі електропостачання. З наведеної осцилограми видно, що під час увімкнення пічного трансформатора спостерігаються значні перевантаження фільтра другої гармоніки як за напругою, так і за струмом. Крім того, виразно можна простежити, що зі згасанням струму ввімкнення у певні відрізки часу струм другої гармоніки наростає.

Серед факторів, які визначають вимоги до конструкції фільтра, особливе місце займають перехідні процеси, що супроводжують увімкнення та вимкнення фільтрів у нормальних експлуатаційних режимах мережі. Ці комутації можуть спричинити значні перенапруги на шинах підстанції, тому потрібно знати характеристики та особливості процесів, які їх супроводжують. Крім того, як свідчать деякі дослідження [5], у мережах зі значним рівнем гармонік вимкнення окремих фільтрів має свої особливості і може призводити до перенапруг, що перевищують допустимі імпульсні перенапруги за чинними стандартами для обладнання цього класу.

Типи вимикачів, котрі використовують у колах комутації ФКК, можуть мати суттєвий вплив на характер і амплітуду перехідної перенапруги, що виникає під час комутацій. На це потрібно звертати особливу увагу під час опрацювання схем ФКК [3–7]. Широко використовувані у колах конденсаторних батарей олійні вимикачі часто спричиняють під час ко-

мутацій перенапруги значної величини [8]. Це пов'язано з повільним наростанням діелектричної здатності міжконтактного проміжку відносно напруги відновлення, що є причиною повторних запалювань дуги між контактами і, як наслідок, зростання перенапруг. Ці перенапруги можуть бути причиною частого спрацювання розрядників, які встановлені на шинах підстанції і фільтрових реакторах ФКК [4–6, 7–9]. Тому потрібно ретельно підходити до визначення теплових навантажень розрядників, особливо, коли це стосується металоксидних типів розрядників.

Вимикачі газового типу (повітряні та елегазові) мають набагато кращу здатність вимикати ємнісні струми, але, переважно, їх використовують для комутації потужних конденсаторних батарей на напругах високого класу. Як правило, вимкнення не супроводжується багатократними пробиттями міжконтактних проміжків і має більш сприятливий характер, хоча небезпечні перенапруги під час комутацій теж можуть існувати.

Вакуумні вимикачі переважно використовують для комутацій конденсаторних батарей нижчого класу напруги. Але добре відомою є проблема перенапруг при їх роботі через високу розривну здатність. Тут зареєстровано набагато вищі перенапруги під час комутацій конденсаторних батарей порівняно з іншими типами вимикачів [10].

Розглянемо характерні режими комутацій фільтрів, котрі є визначальними під час опрацювання їх схем. Досвід показує, що ігнорування цих режимів під час проектування може бути причиною їх пошкодження через термічні чи діелектричні перевантаження.

Ввімкнення фільтрів. Відомо, що ввімкнення конденсаторних батарей супроводжується виникненням перенапруги на шинах підстанції, яка в практичних випадках не перевищує 1,5...1,7, та "зрізом" фазних та лінійних напруг у перший момент комутації. Крутизна "зрізу" визначається власними ємностями обладнання, індуктивностями реакторів у фазах конденсаторних батарей та еквівалентними індуктивностями джерела на шинах підстанції. Своєю чергою, частота перехідної напруги визначається ємностями конденсаторних батарей та вказаними індуктивностями. Як показали дослідження, у наведеній системі електропостачання максимальна кратність перенапруги на фільтрових реакторах не перевищує 1,6 фазної напруги.



Рис.2. Осцилограми перехідних струмів та напруг фільтрового реактора другої гармоніки під час увімкнення пічного трансформатора у досліджуваній системі електропостачання.

Вимкнення фільтрів. Якщо вимкнення кола фільтра відбувається після першого переходу струму вимкнення через нуль і вимикач витримує напругу відновлення, яка виникає на його контактах, то процес не супроводжується небезпечними перенапругами. Проте з виникненням повторних запалювань дуги в міжконтактних проміжках у колах фільтрів можуть виникати суттєво більші перенапруги та надструми, ніж під час їх увімкнення. Розглянемо особливість вимкнення фільтра, яке супроводжується повторними запалюваннями дуги в міжконтактних проміжках. Для моделювання вимкнення фільтра другої гармоніки у схемі рис.1 була прийнята типова вольт-секундна характеристика вимикача типу ВВП-35, котра має місце під час вимкнення робочих струмів. Під час вимкнення контролювалися напруги відновлення на контактах і їх порівнювали зі значенням напруги з вольт-секундної характеристики, починаючи з часу першого згасання струму у цій фазі. На рис.3 показано осцилограми, які характеризують перехідні надструми та перенапруги на поздовжній ізоляції аналізованого фільтра другої гармоніки під час повторних пробиттів міжконтактних проміжків і наступному згасанні дуги після першого переходу через нуль супроводжувачого струму.

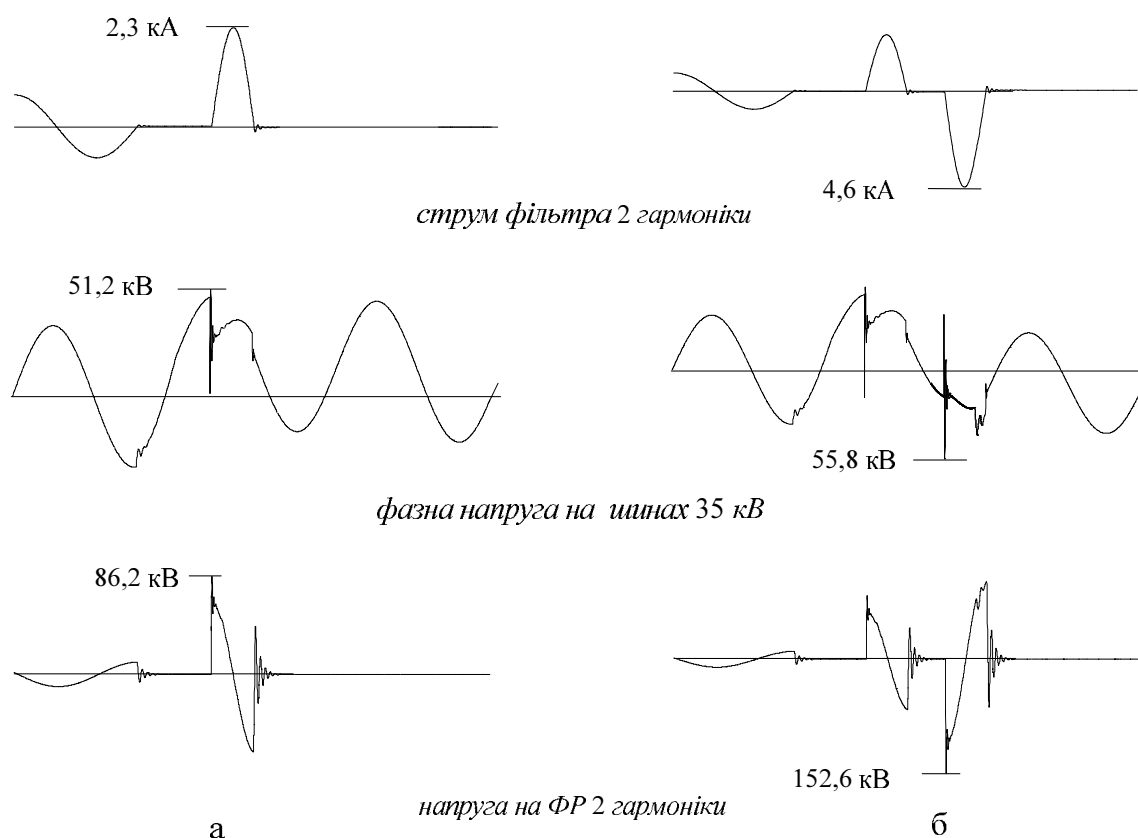


Рис.3. Модельні осцилограми струмів і напруг під час вимкнення фільтра другої гармоніки з однократним повторним трифазним пробиттям міжконтактного проміжку вимикача (а) та під час його вимкнення з двократним повторним трифазним пробиттям міжконтактного проміжку вимикача (б) у досліджуваній схемі електропостачання.

Високочастотні складові перенапруг на шинах підстанції, що існують під час вимкнення фільтрів і є наслідком наявності власних ємностей обладнання, можуть бути

зменшені під'єднанням відповідно вибраних RC -демпферів між фазою і землею [7]. У зв'язку з цим, кратності перенапруг на шинах, як правило, у цих експлуатаційних режимах не перевищують 2,0, а їх швидкості наростання суттєво зменшуються.

Вплив гармонік на рівень комутаційних перенапруг. Вимкнення окремих фільтрів ФКК, струми котрих містять різний спектр і значення гармонік мають свої особливості. Як показали дослідження, вміст гармонік у струмі вимкнення фільтра підвищує рівень перехідних перенапруг. Значення залишкової напруги фільтра залежить також від взаємного зсуву фаз між основною та вищою гармоніками струму фільтра. Найвищі рівні залишкової напруги спостерігаються з кутами зсуву, близькими до нуля. З зростанням залишкової напруги на фазах фільтра під час вимкнення зростає напруга відновлення на контактах вимикача, зумовлюючи більшу ймовірність повторних запалювань і, отже, створюючи важчі умови вимкнення. Так, якщо вміст струму другої гармоніки фільтра другої гармоніки дорівнює струмові першої, то в досліджуваній системі електропостачання амплітуда перенапруги на фільтрі під час його вимкнення з повторним пробиттям міжконтактного проміжку вимикача збільшується на 26 % порівняно з випадком відсутності у колі фільтра другої гармоніки.

У табл.2 наведено значення максимальних перенапруг та надструмів фільтрового реактора, одержані під час моделювання визначальних експлуатаційних режимів.

Таблиця 2

Напруги та струми фільтрового реактора другої гармоніки в експлуатаційних режимах

№ п/п	Експлуатаційний режим	Напруга, кВ	Струм, кА
1	Усталений (діюче значення)	9,6	0,38
2	Ввімкнення пічного трансформатора (амплітудне значення)	83,8	2,35
3	Ввімкнення фільтра (амплітудне значення)	47,3	2,4
4	Повторні запалювання дуги між контактами вимикача під час його вимкнення (амплітудне значення)	86,2	2,3

Використовуючи дані табл.2, згідно з формулами з табл.1, одержимо розрахункові параметри фільтра другої гармоніки, які необхідно забезпечити у досліджуваній системі електропостачання. Вони наведені у табл.3. Розрахунковими значеннями, котрі характеризують комутаційні режими, вибрані найбільші значення U , I , $I_{к.з.}$, отримані за виразами табл.1.

Таблиця 3

Порівняльні параметри фільтрового реактора другої гармоніки у схемі рис.1

Методика розрахунку	Розрахункова напруга, кВ	Розрахунковий струм, кА	Розрахунковий струм к.з., кА
Традиційна	9,4	0,38	1,2
З врахуванням комутаційних режимів	39,6*	0,38	5,0*

Примітка: *Розрахункові значення відповідають режиму ввімкнення пічного трансформатора.

Очевидно, що врахування дії надструмів та перенапруг має суттєве значення у виборі розрахункових параметрів фільтрових реакторів. Подібна процедура вибору повинна бути здійснена і для інших фільтрових реакторів ФКК. Тут потрібно наголосити, що для правильної оцінки розрахункових параметрів необхідно здійснювати аналіз кожного конкрет-

ного випадку застосування ФКК. Співвідношення координат експлуатаційних режимів, взагалі кажучи, можуть значною мірою відрізнятися від одержаних у наведеному прикладі.

1. Witte J.F., Decessaro F.P., Mendi S.R. *Damaging longterm overvoltages on industrial capacitor banks due to transformer energization inrush current* // *Conf. Record of the 1993 IEEE IAS 28 annual meeting, Toronto. 1993. P.1543.*
2. Varetsky J., Jurahivski A. *Transformer energizing in industrial power system with SVC* // *Proc. of 5-th Int. Conf. "Electrical power quality and utilization", Cracow. 1999. P.453–458.*
3. Bonner J.A., Hurst W.M., Rocamora R.G. et al. *Selecting ratings for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters* // *IEEE Trans. on Power Delivery. 1995. Vol.10. № 1. P.547–555.*
4. Harder T.E. *AC filter arrester application* // *IEEE Trans. on Power Delivery. 1996. Vol.11. № 3. P.1355–1360.*
5. Nishikawa H., Yokokura K., Masuda S. et al. *Harmonic current interruption phenomena in arc furnace filter circuits* // *IEEE Trans. on PAS. 1984. Vol.103. № 10. P.3000–3006.*
6. *Impact of shunt capacitor banks on substation surge environment and surge arrester applications. Report by Working Group 3.4.17 of the IEEE Surge Protective Committee* // *IEEE Trans. on Power Delivery. 1996. Vol.11. № 4. P.1798–1807.*
7. Nishikawa T., Murabayashi K., Aoyama F. *Overvoltage protection of static VAR compensation system* // *IEEE Trans. on PAS. 1983. Vol.102. № 7. P.2335–2340.*
8. Лихачев Ф.А. *Повышение надежности мощных батарей конденсаторов* // *Электрические станции. 1979. № 11. С.44–49.*
9. ГОСТ 1516.1–76. *Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М., 1985.*
10. Boehne E.W., Low S.S. *Shunt capacitor energization with vacuum interrupters – a possible source of overvoltage* // *IEEE Trans. on PAS. 1969. Vol.88. № 9. P.1424–1443.*

УДК 621.314.58

Василів К.М.

Український державний лісотехнічний університет, кафедра ОТ і МТП

МЕТОД КВАЗІКОМБІНОВАНИХ СХЕМ І ВУЗЛОВИХ УТОЧНЕНЬ СТРУМІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

© Василів К.М., 2000

Метод ґрунтується на математичній моделі СПЧ з постійною схемою і постійною структурою системи рівнянь зі змінними реактивними параметрами. Математична модель забезпечує ефект змінності схеми і структури системи рівнянь та числову стійкість на необмеженому проміжку часу інтегрування.

У практиці моделювання статичних перетворювачів частоти (СПЧ) як структурних елементів силових електричних кіл найефективнішими є методи двох напрямків, перший з яких передбачає опис електромагнітних процесів диференціальними рівняннями елек-