

УДК 621.311.004.12

О. В. ГОРПИНИЧ – к.т.н., доц., м. Маріуполь, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», gorpnich@hitline.net.ua

Т. М. СЕРДЮК – к.т.н., доц., м. Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru

ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СКЛАДОВИХ НА КОНДЕНСАТОРИ ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА СЕРІЇ SINAMICS S120 ФІРМИ SIEMENS

Статтю представив д.т.н., проф. І. В. Жежелев

Вступ

В найбільш застосовуваних у регульованому електроприводі перетворювачах частоти з ланкою постійного струму задана вихідна синусоїдна напруга на обвитках електродвигуна формується автономним інвертором, як правило, за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). В якості електронних ключів у інверторах застосовуються запірні тиристори GTO та їхні вдосконалені модифікації GCT, IGCT,

SGCT або ж біполярні транзистори з ізолюваним затвором IGBT, що комутуються з дуже великою швидкістю наростання вихідної напруги (до 50 кВ/мкс) та частотою прямування імпульсів (порядку 20 кГц). Це призводить до того, що в кривій вихідної напруги та напруги ланки постійного струму з'являються високочастотні складові напруги з частотою у декілька кГц (відповідно, з'являються й пульсації струму (рис. 1)).

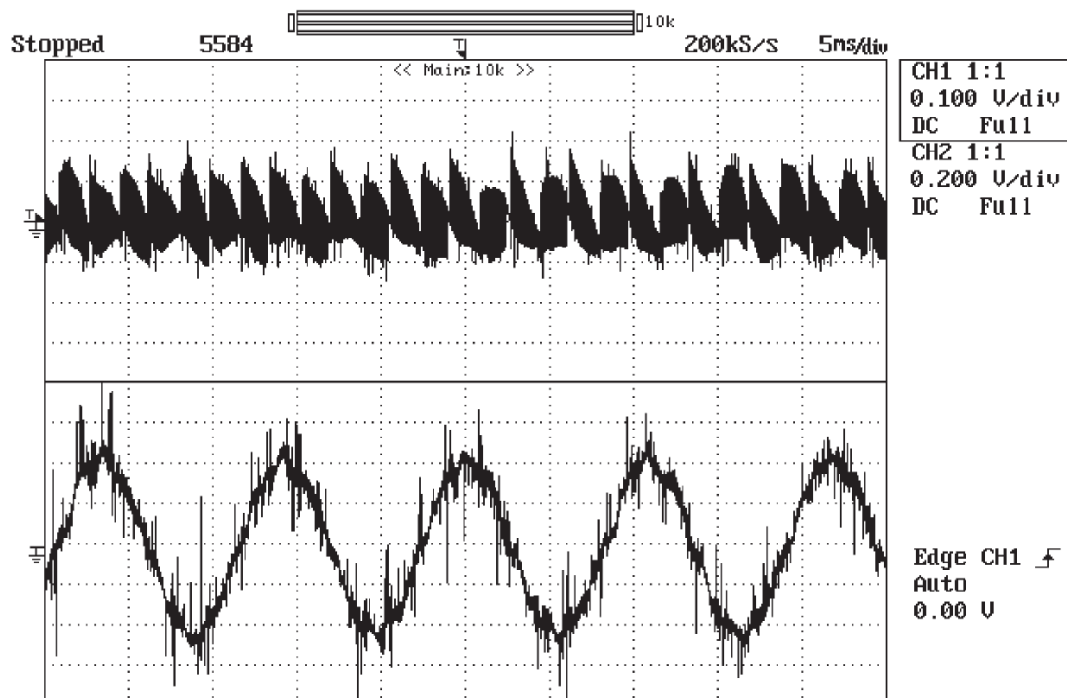


Рис. 1. Отримані у результаті вимірювань струм конденсатора ланки постійного струму (верхня крива) та вихідний фазний струм (нижня крива) [1]

Наявність цих складових призводить до погіршення показників електромагнітної сумісності та негативно впливає як на роботу електродвигуна, так і на роботу елементів перетворювача частоти, особливо на втрати потужності, температуру і термін служби конденсаторів ланки постійного струму за рахунок прискореного старіння ізоляції. Так, на прокатному стані 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» за час експлуатації в період з травня 2012 р. по жовтень 2012 р. були зафіксовані два випадки виходу з ладу модулів двигуна частотного перетворювача серії SINAMICS S120 фірми Siemens через пробиття конденсаторів ланки постійного струму. Частотний перетворювач SINAMICS S120 використовується на прокатному стані для приводу правильної машини. Потужність асинхронних двигунів, які приводяться, складає 1,5 МВт. Ланка постійного струму входить до складу модуля двигуна та складається з 3-х окремих модулів по 9 електролітичних конденсаторів фірми Epcos у кожному.

Отже, мета роботи та її практичне значення – на прикладі частотного перетворювача серії SINAMICS S120 фірми Siemens представити алгоритм оцінки впливу високочастотних складових на втрати потужності, температуру і термін служби конденсаторів ланки постійного струму та рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності.

Одним з шляхів підвищення надійності є заміна дев'ятох електролітичних конден-

саторів фірми Epcos чотирма плівковими конденсаторами фірми AVX. Питання впливу високочастотних складових на характеристики електролітичних конденсаторів розглянуті у роботах [2-10], проте вплив цих складових на плівкові конденсатори з самовідновлювальною ізоляцією недостатньо досліджений як у вітчизняній, так й у закордонній науковій літературі [1, 11-13].

Структурна схема для оцінки терміну служби конденсатору показана на рис. 2, тобто необхідно знати еквівалентний послідовний опір (equivalent series resistance (ESR)), частотний спектр пульсуючого струму та параметри теплової моделі, що дозволить визначити втрати потужності, температуру в найбільш нагрітій точці та термін служби конденсатору.

Під пульсуючим струмом розуміють середньоквадратичне значення змінного струму, який викликаний пульсуючою напругою. Величина пульсуючого струму залежить від тангенса кута втрат, який пов'язаний з ESR. У свою чергу тангенс кута втрат залежить від частоти прикладеної напруги, отже, й пульсуючий струм також залежить від частоти. Зазвичай в технічних описах наводяться значення максимально припустимого струму пульсацій для частоти 100 або 120 Гц, в деяких випадках – для частоти 10 або 20 кГц. Крім того, наводиться графік нормованих залежностей для перерахунку на інші робочі частоти.



Рис. 2. Структурна схема для оцінки терміну служби конденсатору

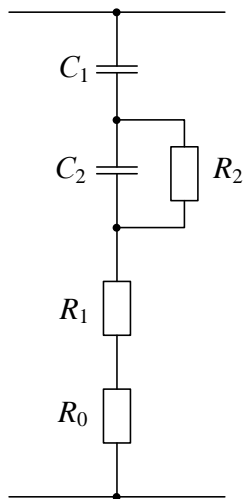


Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення електролітичного конденсатора:

R_0 – опір фольги; R_1 – опір електроліту; C_1 – ємність на виводах конденсатора; R_2 та C_2 – опір та ємність, які характеризують діелектричні втрати, відповідно

Еквівалентна схема заміщення електролітичного конденсатора показана на рис. 3. Відповідно до рис. 3 повний опір конденсатора:

$$Z_{\text{cap}} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} - j2\pi f C_2} + R_1 + R_0 - \frac{j}{2\pi f C_1}, \quad (1)$$

де f – частота.

Для оцінки втрат потужності та відповідного нагріву, які викликаються пульсуючим струмом, необхідна тільки дійсна частина повного опору конденсатора:

$$\text{ESR} = \text{Real}(Z_{\text{cap}}). \quad (2)$$

$$\text{Real}(Z_{\text{cap}}) = R_1 + R_0 + \frac{R_2}{1 + (2\pi f R_2 C_2)^2}. \quad (3)$$

Підвищення температури призводить до зниження ESR, тому що опір R_1 знижується через збільшення провідності електроліту. Вплив температури на опір R_1 можна оцінити за допомогою виразу:

$$R_1 = R_{1\text{base}} e^{\frac{T_{\text{base}} - T_{\text{core}}}{F}}, \quad (4)$$

де $R_{1\text{base}}$ – опір R_1 при базовій температурі T_{base} (27 °C); T_{core} – температура конденсатора, °C; F – температурний коефіцієнт, K⁻¹.

Параметри еквівалентної схеми заміщення електролітичного конденсатора типу B43564 фірми Epcos, який використовується в ланці постійного струму частотного перетворювача серії SINAMICS S120 правильної машини, наведені у табл. 1 (ланка постійного струму складається з 3-х модулів по 9 конденсаторів у кожному).

Таблиця 1

Параметри електролітичного конденсатора типу B43564 фірми Epcos

Параметри	Значення
ESR при частоті 100 Гц	35 мОм
Опір фольги R_0	5,03 мОм
Опір R_1 при базовій температурі (27 °C)	6 мОм
Температурний коефіцієнт F	21 K ⁻¹
Опір, який характеризує діелектричні втрати R_2	38,35 мОм
Ємність на виводах конденсатора C_1	4700 мкФ
Ємність, яка характеризує діелектричні втрати C_2	11,6 мкФ
Температура конденсатора T_{core}	50 °C
Максимально припустимий струм	40 А

Відповідно до виразів (3) та (4) при частоті 20 кГц та температурі 50 °C:

$$\text{ESR} = 2,006 + 5,03 + \frac{38,35}{1 + (2\pi \cdot 20 \cdot 38,35 \cdot 11,6 \cdot 10^{-6})^2} = 45,23 \text{ мОм}.$$

$$R_1 = 6 \cdot e^{\frac{300-323}{21}} = 2,006 \text{ мОм}.$$

При частоті вище 1 кГц ESR плівкового конденсатора можна визначити як функцію від частоти за виразом [1]:

$$\text{ESR}(f) = (R_s - A_s) + K(f) \cdot A_s, \quad (5)$$

де R_s – базовий опір; A_s – параметр, який задається виробником; пов'язаний з розмірами конденсатора; f – частота, кГц; $K(f)$ – функція, яка враховує вплив частоти; за-

звичай ця функція задається виробником у вигляді графіку.

$K(f)$ можна представити у вигляді кубічної поліноміальної функції:

$$K(f) = k_3 \cdot f^3 + k_2 \cdot f^2 + k_1 \cdot f + k_0, \quad (6)$$

де коефіцієнти k_0 – k_3 оцінюються за допомогою методу найменших квадратів.

На відміну від електролітичних конденсаторів, значення ESR плівкового конденсатору збільшується зі зростанням частоти. Його чутливість до температури значно менша, ніж у електролітичного конденсатора, тому що ESR визначається, головним чином, опорами виводів конденсатору, а не опором електроліту.

Розглянемо можливість застосування у ланці постійного струму частотного перетворювача SINAMICS S120 правильної машини плівкових конденсаторів замість електролітичних. Для цього з урахуванням припустимого струму обираємо у складі кожного модулю ланки постійного струму замість дев'ятох електролітичних конденсаторів типу B43564 фірми Epcos чотири плівкових конденсатора типу FFVE4I0227K фірми AVX. Параметри цих конденсаторів наведені у табл. 2.

В якості прикладу наведемо розрахунок ESR за виразами (5) та (6) при частоті 100 кГц.

$$K(f) = 3,173 \cdot 10^{-7} \cdot 100^3 + (-0,000124) \cdot 100^2 + 0,02369 \cdot 100 + 1,014 = 2,46.$$

$$\text{ESR}(f) = (0,9 - 0,24) + 2,46 \cdot 0,24 = 1,25 \text{ мОм}.$$

Оскільки значення ESR електролітичних та плівкових конденсаторів залежать від частоти, для характеристики пульсуючого струму конденсатора при заданій частоті вводять спеціальний коефіцієнт

$$M_f = \frac{I_f}{I_{100}} = \sqrt{\frac{\text{ESR}_{100}}{\text{ESR}_f}}, \quad (7)$$

де I_{100} та ESR_{100} – номінальний пульсуючий струм та значення ESR при частоті 100 Гц, відповідно; I_f та ESR_f – пульсуючий струм та значення ESR при частоті f .

У табл. 3 наведені значення ESR для різних частот.

Таблиця 2

Параметри плівкового конденсатора
типу FFVE4I0227K фірми AVX

Параметри	Значення
ESR при частоті 100 Гц	1 мОм
Ємність на виводах конденсатору C_1	220 мкФ
Базовий опір R_s	0,9 мОм
Параметр A_s	0,24 мОм
Коефіцієнт k_3	$3,173 \cdot 10^{-7}$
Коефіцієнт k_2	-0,000124
Коефіцієнт k_1	0,02369
Коефіцієнт k_0	1,014
Максимально припустимий струм	100 А

Таблиця 3

Зміна ESR зі зростанням частоти

Частота, кГц	$K(f)$	$\text{ESR}(f)$, мОм
0,1	1,016	1
1	1,038	1
10	1,239	0,957
20	1,441	1,006
30	1,622	1,049
40	1,784	1,088
50	1,928	1,123
60	2,058	1,154
70	2,174	1,182
80	2,278	1,207
90	2,373	1,23
100	2,460	1,25

В якості прикладу наведемо розрахунок цього коефіцієнту для плівкового та електролітичного конденсаторів при частоті 10 кГц.

$$M_{f \text{ плівк.}} = \sqrt{\frac{1}{0,96}} = 1,02.$$

$$M_{f \text{ елект.}} = \sqrt{\frac{45,33}{35}} = 0,88.$$

В табл. 4 наведені значення коефіцієнтів M_f для плівкового та електролітичного конденсаторів при різних частотах.

При просторово-векторній модуляції (space vector modulation (SVM)) середньоквадратичне значення пульсуючого струму конденсатору $I_{\text{сар}}$ можна визначити наступним чином [1]:

$$I_{\text{сар}} = I_N \left[\frac{M}{32\pi} \left[4\sqrt{3}(4\cos 2\varphi + 6) - 9\pi M (\cos 2\varphi + 1) \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

де M – індекс модуляції; I_N – амплітуда фазного вихідного струму; $\cos \varphi$ – зсув фаз між вихідним струмом інвертору та напругою.

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів M_f для плівкового та електролітичного конденсаторів при різних частотах

Частота, кГц	ESR _{f елект.} , мОм	$M_{f \text{ елект.}}$	ESR _{f плівк.} , мОм	$M_{f \text{ плівк.}}$
10	45,33	0,88	0,96	1,02
20	45,23	0,88	1,01	1,00
30	45,09	0,88	1,05	0,98
40	44,88	0,88	1,09	0,96
50	44,62	0,89	1,12	0,94
60	44,31	0,89	1,15	0,93
70	43,94	0,89	1,18	0,92
80	43,53	0,90	1,21	0,91
90	43,08	0,90	1,23	0,90
100	42,58	0,91	1,25	0,89

Індекс модуляції $M_{I_{\text{сар(max)}}}$, який відповідає максимальному значенню середньоквадратичного пульсуючого струму конденсатора, деякою мірою залежить від стратегії модуляції. При стратегіях модуляції SVM та SPWM (sinusoidal pulse-width modulation – синусоїдна ШІМ) його значення визначається відповідно до виразу (9), при стратегії модуляції ТНІ (third-harmonic injection – модуляція з інжекцією третьої гармоніки) – відповідно до виразу (10):

$$M_{I_{\text{сар(max)}}} = \left[\frac{4\sqrt{3}(2\cos 2\varphi + 3)}{9\pi(2\cos 2\varphi + 1)}; 1 \right]; \quad (9)$$

$$M_{I_{\text{сар(max)}}} = \left[\frac{4\sqrt{3}(2\cos 2\varphi + 3)}{9\pi(\cos 2\varphi + 1)}; 1,15 \right]. \quad (10)$$

На рис. 4 показана залежність відношення $I_{\text{сар}}/I_N$ від індексу модуляції M та коефіцієнту потужності навантаження $\cos \varphi$. Синя лінія характеризує максимальне значення середньоквадратичного пульсуючого струму конденсатора при стратегії модуляції ТНІ, причому індекс модуляції може змінюватися у діапазоні від 0 до 1,15. Чорна лінія зображує верхню межу значення $M_{I_{\text{сар(max)}}}$ ($M=1$) при стратегіях модуляції SPWM або SVM. Для типових умов експлуатації залежність $M_{I_{\text{сар(max)}}}$ від коефіцієнту потужності навантаження $\cos \varphi$ показана на рис. 5.

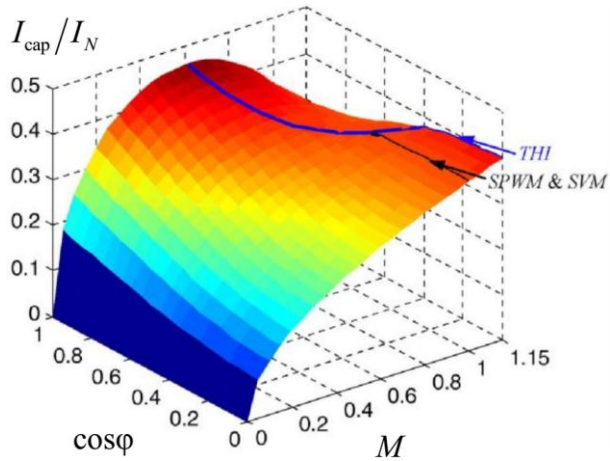


Рис. 4. Залежність відносного значення значення пульсуючого струму конденсатору I_{cap}/I_N від індексу модуляції M та коефіцієнту потужності навантаження $\cos \varphi$ при різних стратегіях модуляції

З рис. 5 витікає, що якщо $\cos \varphi$ менший за певне порогове значення, то величина $M_{I_{\text{cap(max)}}}$ досягає верхньої межі при даній стратегії модуляції. При стратегії модуляції THI порогове значення $\cos \varphi = 0,43$, в той час як при стратегіях модуляції SVM та SPWM порогове значення $\cos \varphi = 0,49$. Таким чином, можна відзначити п'ять характерних режимів роботи P_1 - P_5 (табл. 5). В табл. 6 наведені вирази для оцінки пульсуючої напруги конденсатору при різних стратегіях модуляції (в.о.).

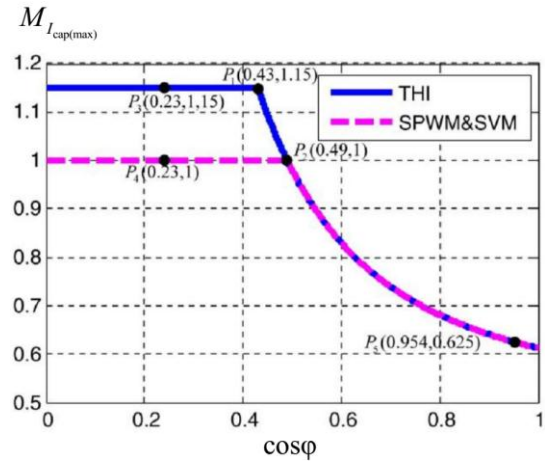


Рис. 5. Залежність індексу модуляції $M_{I_{\text{cap(max)}}}$ від коефіцієнту потужності навантаження $\cos \varphi$

Таблиця 5

Характерні режими роботи P_1 - P_5

Режим роботи	Індекс модуляції M	Коефіцієнт потужності навантаження $\cos \varphi$
P_1	1,15	0,43
P_2	1	0,49
P_3	1,15	0,23
P_4	1	0,23
P_5	0,625	0,954

Таблиця 6

Вирази для оцінки пульсуючої напруги конденсатору при різних стратегіях модуляції

Стратегія модуляції	Пульсуюча напруга конденсатору (в.о.)
SPWM	$\frac{M}{16} \left[\left(6 - \frac{96\sqrt{3}}{5\pi} M + \frac{9}{2} M^2 \right) \cos^2 \varphi + \frac{8\sqrt{3}}{5\pi} M \right]^{0,5}$
SVM	$\frac{M}{16} \left[\left(6 - \frac{96\sqrt{3}}{5\pi} M + \frac{108\pi - 81\sqrt{3}}{16\pi} M^2 \right) \cos^2 \varphi + \frac{8\sqrt{3}}{5\pi} M \right]$
THI	$\frac{M}{16} \left[\left(6 - \frac{96\sqrt{3}}{5\pi} M + \frac{63}{16} M^2 \right) \cos^2 \varphi + \frac{8\sqrt{3}}{5\pi} M \right]^{0,5}$

Базове значення пульсуючої напруги конденсатору

$$U_{b\text{ cap}} = \frac{I_N}{C_d f_1}, \quad (11)$$

де C_d – ємність ланки постійного струму;
 f_1 – частота комутації інвертору.

На рис. 6 показана залежність пульсуючої напруги конденсатору (в.о.) від індексу модуляції M та коефіцієнту потужності навантаження $\cos\varphi$ при різних стратегіях модуляції. Якщо коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi$ дорівнює нулю, рівні пульсуючої напруги будуть однаковими для усіх трьох стратегій модуляції. Якщо коефіцієнт потужності навантаження $\cos\varphi$ не дорівнює нулю, то при стратегії модуляції SPWM буде самий високий рівень пульсуючої напруги, при стратегії модуляції THI – самий низький, а при стратегії модуляції SVM – ближче до самого низького.

Частотні спектри пульсуючого струму конденсатора i_{cap} для різних режимів роботи та стратегій модуляції наведені у табл. 7 та на рис. 7.

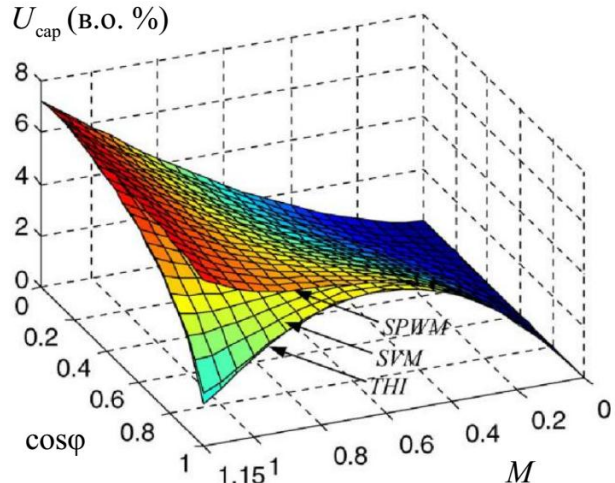


Рис. 6. Залежність пульсуючої напруги конденсатору (в.о.) від індексу модуляції M та коефіцієнту потужності навантаження $\cos\varphi$ при різних стратегіях модуляції

Частотний спектр містить значну кількість складових, кратних частоті комутації інвертору f_1 , та їх комбінаційних складових (бічних частот – sidebands (SBs)). Аналіз наведених спектрів засвідчує, що найбільші величини високочастотних складових будуть за стратегії модуляції SVM у режимі $P_5 (M = 0,625, \cos\varphi = 0,954)$ (рис. 7, а).

Таблиця 7

Частотні спектри пульсуючого струму конденсатора для різних режимів роботи та стратегій модуляції

Режим роботи	Модуляція	Основні три складових найбільшої величини (у % від I_N)					
		Частота	Величина	Частота	Величина	Частота	Величина
P_4	SPWM	$3 f_1$ sbs	19,2	f_1 sbs	17,2	$2 f_1$	10,2
P_4	SVM	f_1 sbs	16,6	$3 f_1$ sbs	15,9	$2 f_1$	11,7
P_1	THI	f_1 sbs	20,2	$3 f_1$ sbs	12,3	$2 f_1$	7,3
P_1	THI	f_1 sbs	19,7	$2 f_1$	13,6	$3 f_1$ sbs	11,4
P_2	SPVM	$2 f_1$	21,7	f_1 sbs	15,4	$3 f_1$ sbs	14,7
P_2	SVM	$2 f_1$	21,7	$3 f_1$ sbs	17,4	f_1 sbs	17
P_5	SPWM	$2 f_1$	49,2	$4 f_1$	13,1	$3 f_1$ sbs	11,1
P_5	SVM	$2 f_1$	52	$4 f_1$	14	$6 f_1$	9,9
P_5	THI	$2 f_1$	48,8	$3 f_1$ sbs	9,9	$4 f_1$	8,7

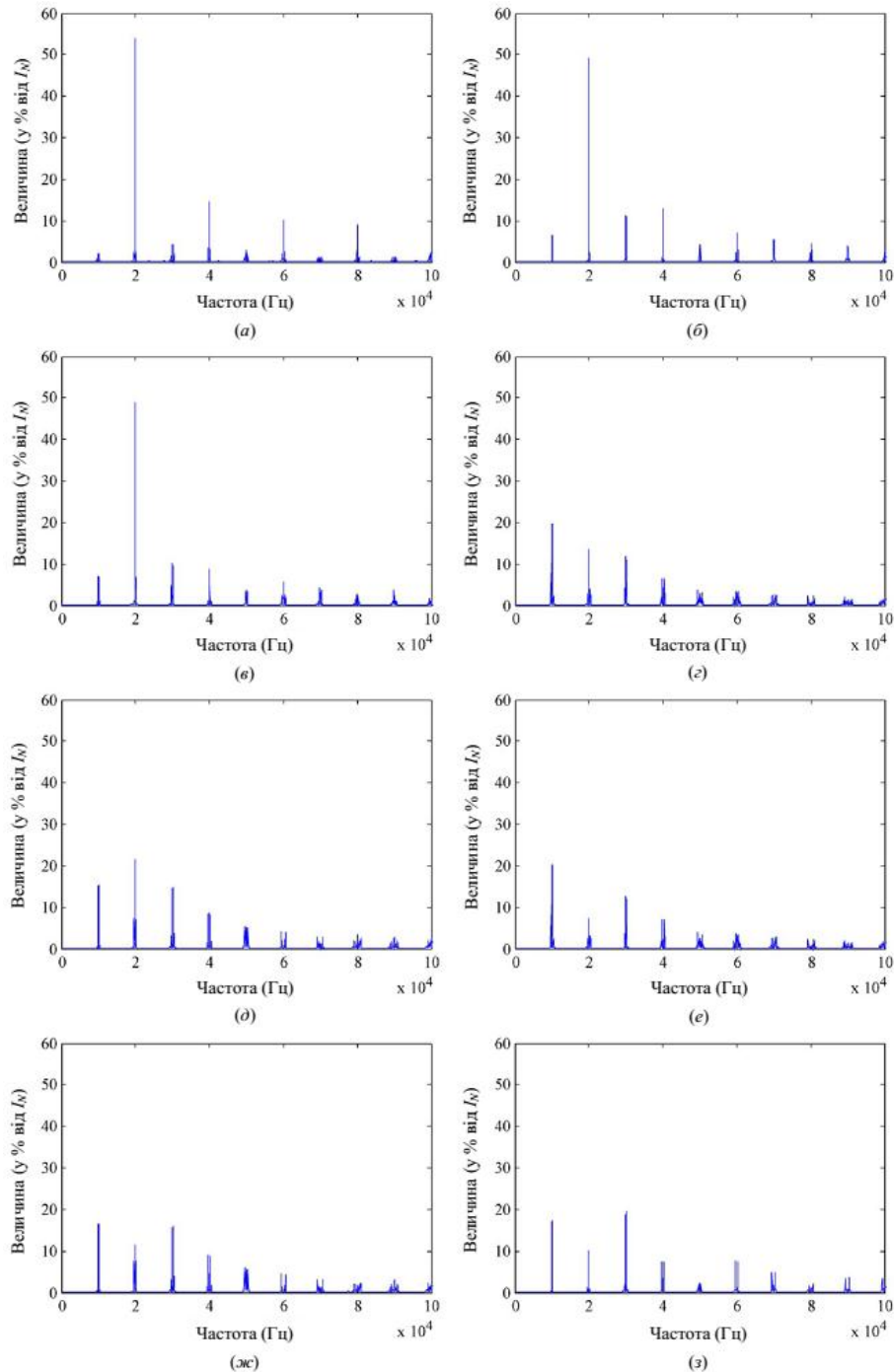


Рис. 7. Частотні спектри пульсуючого струму конденсатора для різних режимів роботи та стратегій модуляції:

а – SVM, $P_5(M = 0,625, \cos \varphi = 0,954)$; б – SPWM, $P_5(M = 0,625, \cos \varphi = 0,954)$; в – TH1, $P_5(M = 0,625, \cos \varphi = 0,954)$; г – TH1, $P_1(M = 1,15, \cos \varphi = 0,43)$; д – SVM, $P_2(M = 1, \cos \varphi = 0,49)$; е – TH1, $P_3(M = 1,15, \cos \varphi = 0,23)$; ж – SVM, $P_4(M = 1, \cos \varphi = 0,23)$; з – SPWM, $P_4(M = 1, \cos \varphi = 0,23)$

Можна побачити, що в цьому випадку амплітуда складової 20 кГц дорівнює 52 %, амплітуда складової 40 кГц – 14 %, амплітуда складової 60 кГц – 9,9 %, амплітуда складової 80 кГц – 9 %.

Виконаємо оцінку втрат потужності та додаткового нагріву, виникаючих у електролітичному та плівковому конденсаторі ланки постійного струму за рахунок високочастотних складових. Втрати потужності у конденсаторі ланки постійного струму можна представити у вигляді суми втрат потужності від окремих високочастотних складових з урахуванням коефіцієнту M_f , який характеризує пульсуючий струм конденсатору при даній частоті:

$$P_{\text{cap}} = \sum ESR_{f_i} \cdot (I_{\text{cap } f_i})^2 = ESR_{100} \sum \left(\frac{I_{\text{cap } f_i}}{M_f} \right)^2, \quad (12)$$

де ESR_{f_i} – величина ESR при частоті f_i ; $I_{\text{cap } f_i}$ – середньоквадратичне значення струму складової частоти f_i .

За прийнятої на прокатному стані 3600 металургійного комбінату «Азовсталь»

комплектації модулів двигуна частотного перетворювача серії SINAMICS S120 використовується стратегія модуляції SVM, тому для частотного спектру з найбільшими величинами високочастотних складових саме за стратегії модуляції SVM (режим $P_5 (M=0,625, \cos \varphi=0,954)$ на рис. 7, а) згідно з виразом (12) виконаємо розрахунок втрат потужності у електролітичному та плівковому конденсаторі ланки постійного струму. Результати розрахунку втрат потужності наведені у табл. 8 (значення ESR_{f_i} та M_f наведені у табл. 4).

Аналіз отриманих результатів засвідчує, що втрати потужності від високочастотних складових у плівковому конденсаторі приблизно у 7 разів менші, ніж у електролітичному, що пояснюється його більш низьким опором.

Температуру конденсатора можна розрахувати, спираючись на втрати потужності та еквівалентну теплову схему заміщення (рис. 8).

Таблиця 8

Результати розрахунку втрат потужності у електролітичному конденсаторі типу B43564 фірми Epcos та плівковому конденсаторі типу FFVE4I0227K фірми AVX

Частота, кГц	Величина (у % від I_N)	Електролітичний		Плівковий	
		$I_{\text{cap } f_i}$, А	$P_{\text{cap } f_i}$, Вт	$I_{\text{cap } f_i}$, А	$P_{\text{cap } f_i}$, Вт
10	2,1	0,84	0,032	2,1	0,004
20	52	20,8	19,571	52	2,720
30	5	2	0,180	5	0,026
40	14	5,6	1,408	14	0,213
50	3	1,2	0,064	3	0,010
60	9,9	3,96	0,695	9,9	0,113
70	1,5	0,6	0,016	1,5	0,003
80	9	3,6	0,564	9	0,098
90	1,5	0,6	0,016	1,5	0,003
100	3	1,2	0,061	3	0,011
		Разом P_{cap}	22,6	Разом P_{cap}	3,2

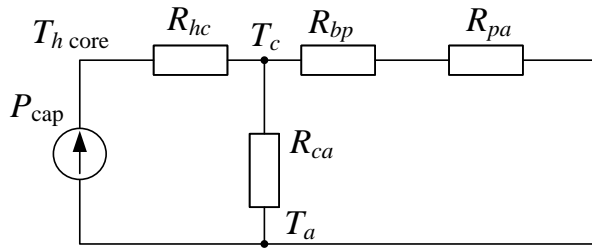


Рис. 8. Еквівалентна теплова схема заміщення конденсатору:

- 1) теплові опори: R_{hc} – між найбільш нагрітою точкою корпусу та основою корпусу; R_{ca} – між основою корпусу та навколишнім середовищем; R_{bp} – між основою корпусу та монтажною платою; R_{pa} – між монтажною платою та навколишнім середовищем; 2) температури: $T_{h\ core}$ – у найбільш нагрітій точці конденсатору; T_c – основи корпусу конденсатора; T_a – навколишнього середовища

Еквівалентний тепловий опір між найбільш нагрітою точкою конденсатору та навколишнім середовищем

$$R_{th} = \left[R_{hc} + \frac{R_{ca}(R_{bp} + R_{pa})}{R_{ca} + R_{bp} + R_{pa}} \right]. \quad (13)$$

Еквівалентний тепловий опір електролітичного конденсатору, притисненого до масивної металізованої монтажної плати, згідно з рекомендаціями [1] можна прийняти $R_{th} = 1,02$ °C/Вт. Еквівалентний тепловий опір плівкового конденсатора типу FFVE4I0227K фірми AVX приймаємо $R_{th} = 7,2$ °C/Вт згідно з каталогом [14].

Температура у найбільш нагрітій точці конденсатору

$$T_{h\ core} = P_{cap} R_{th} + T_a. \quad (14)$$

За типових умов роботи приводу серії SINAMICS S120 правильної машини температура навколишнього середовища складає $T_a = 50$ °C, тому згідно з виразом (14) для електролітичного конденсатору

$$T_{h\ core} = 22,6 \cdot 1,02 + 50 = 73,1$$
 °C;

для плівкового конденсатору

$$T_{h\ core} = 3,2 \cdot 7,2 + 50 = 72,4$$
 °C.

Таким чином, за рахунок високочастотних складових конденсатори обох типів нагрілися приблизно на однакову величину: додатковий нагрів електролітичного конденсатору склав 23,1 °C, плівкового – 22,4 °C.

Термін служби електролітичного та плівкового конденсаторів можна визначити за виразом (враховуючи, що їх додатковий нагрів на 10 °C призводить до скорочення терміну служби у 2 рази):

$$L = L_n \cdot 2^{-\frac{\Delta T}{10}}, \quad (15)$$

де L_n – термін служби конденсатору при максимально припустимій температурі у найбільш нагрітій точці, ч; ΔT – додатковий нагрів, °C.

Отже, за рахунок високочастотних складових при отриманому вище значенні додаткового нагріву електролітичного конденсатора його термін служби скорочується приблизно у 5 разів, тому зафіксовані на прокатному стані 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» в період експлуатації з травня 2012 р. по жовтень 2012 р. випадки виходу з ладу модулів двигуна частотного приводу серії SINAMICS S120 правильної машини через пробиття конденсаторів типу B43564 фірми Epcos ланки постійного струму можуть пояснюватись комбінованим негативним впливом високочастотних складових та підвищеної температури навколишнього середовища у цей період.

На відмову від використовуваних в даний час у ланці постійного струму частотного приводу серії SINAMICS S120 правильної машини електролітичних конденсаторів типу B43564 фірми Epcos, для яких максимально припустима температура складає 85 °C, максимально припустима температура плівкових конденсаторів типу FFVE4I0227K фірми AVX складає 105 °C, тобто на 20 °C більше. Отже, за підвищеної температури навколишнього середовища використання у ланці постійного струму цих плівкових конденсаторів замість елект-

ролітичних дозволить нівелювати негативний вплив додаткового нагріву за рахунок високочастотних складових, який теж, судячи за результатами розрахунку температури у найбільш нагрітій точці конденсатору, може складати біля 20 °С. Окрім цього, за однакової температури 85 °С термін служби плівкових конденсаторів типу FFVE4I0227K фірми AVX у 2 рази більший, ніж у електролітичних конденсаторів типу B43564 фірми Epcos. Їх кількість, габарити та вартість при використанні у ланці

постійного струму також суттєво нижчі (табл. 9).

Таким чином, з метою підвищення експлуатаційної надійності модулів двигуна частотного приводу серії SINAMICS S120 правильної машини прокатного стану 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» можна рекомендувати до використання у ланці постійного струму 4 плівкових конденсатори типу FFVE4I0227K фірми AVX замість 9 електролітичних конденсаторів типу B43564 фірми Epcos.

Таблиця 9

Параметри конденсаторів ланки постійного струму

Параметри	Схема з використанням електролітичного конденсатору	Схема з використанням плівкового конденсатору
Модель	B43564	FFVE4I0227K
Тип конденсатору	Електролітичний	Плівковий
Кількість	9 шт.	4 шт.
Ємність (шт.)	4700 мкФ	220 мкФ
Сумарна ємність	42300 мкФ	880 мкФ
Габарити	76,9×105,7 мм	84,5×45 мм
Максимально припустимий струм	40 А	100 А
Напруга живлення	400 В	400 В
Максимальне значення ESR при 100 Гц	35 мОм	1 мОм
Максимально припустима температура	85 °С	105 °С
Термін служби при 85 °С	15000 ч	30000 ч
Вартість (шт.), \$	112	86
Сумарна вартість, \$	1008	344

Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Досліджено вплив високочастотних складових, які генеруються частотним перетворювачем SINAMICS S120 приводу правильної машини прокатного стану, на втрати потужності, температуру та скорочення терміну служби конденсаторів ланки постійного струму.

2. Виконано аналіз частотних спектрів пульсуючого струму конденсатора для різних режимів роботи і стратегій модуляції (аналіз виконано з урахуванням зміни інде-

ксу модуляції M та коефіцієнту потужності навантаження $\cos\phi$ за трьох стратегій модуляції – просторово-векторної модуляції (space vector modulation (SVM)), модуляції з інжекцією третьої гармоніки (third-harmonic injection (THI)) та синусоїдної широтно-імпульсної модуляції (sinusoidal pulse-width modulation (SPWM))).

3. Встановлено, що частотний спектр пульсуючого струму містить значну кількість складових, кратних частоті комутації інвертору, та їх комбінаційних складових (бічних частот – sidebands (SBs)). Найбіль-

ші величини високочастотних складових відповідають частотному спектру за просторово-векторної модуляції у режимі, коли індекс модуляції $M = 0,625$ та коефіцієнт потужності навантаження $\cos \varphi = 0,954$.

4. Для частотного спектру з найбільшими величинами високочастотних складових виконаний розрахунок втрат потужності та температури у найбільш нагрітій точці електролітичного та плівкового конденсаторів ланки постійного струму. Показано, що при цьому втрати потужності від високочастотних складових у плівковому конденсаторі приблизно у 7 разів менші, ніж у електролітичному, що пояснюється його більш низьким опором. За рахунок високочастотних складових конденсатори обох типів нагрілися приблизно на однакову величину: додатковий нагрів електролітичного конденсатору склав $23,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, плівкового – $22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такий додатковий нагрів відповідає скороченню терміну служби електролітичного конденсатору приблизно у 5 разів у порівнянні з номінальним.

5. Зафіксовані на прокатному стані 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» в період експлуатації з травня 2012 р. по жовтень 2012 р. випадки виходу з ладу модулів двигуна частотного приводу серії SINAMICS S120 правильної машини через пробиття конденсаторів типу B43564 фірми Epcos ланки постійного струму можуть пояснюватись комбінованим негативним впливом високочастотних складових та підвищеної температури навколишнього середовища у цей період.

6. З метою підвищення експлуатаційної надійності модулів двигуна частотного приводу серії SINAMICS S120 правильної машини прокатного стана 3600 металургійного комбінату «Азовсталь» можна рекомендувати до використання у ланці постійного струму чотири плівкових конденсатори типу FFVE4I0227K фірми AVX замість дев'ятох електролітичних конденсаторів типу B43564 фірми Epcos, оскільки за однакової температури навколишнього сере-

довища їх термін служби у 2 рази вищий, а за підвищеної температури навколишнього середовища це дозволить нівелювати негативний вплив додаткового нагріву за рахунок високочастотних складових.

7. Доцільно на базі представленого у статті алгоритму оцінки впливу високочастотних складових на втрати потужності, температуру і термін служби конденсаторів отримати математичні вирази для розрахунку показників функціональної надійності, а також дослідити негативний вплив на термін служби плівкових конденсаторів часткових розрядів, інтенсивність яких зростає у процесі самовідновлення.

Бібліографічний список

1. Analysis and evaluation of DC-link capacitors for high-power-density electric vehicle drive systems / H. Wen, W. Xiao, X. Wen, P. Armstrong // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2012. – Vol. 61. – No. 7. – P. 2950-2964.
2. Gasperi, M. L. A method for predicting the expected life of bus capacitors / M. L. Gasperi // Proc. 32nd IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 5-9 October 1997. – New Orleans, Louisiana (USA). – Vol. 2. – P. 1042-1047.
3. Modeling and analysis of DC link bus capacitor and inductor heating effect on AC drives (Part I) / A. H. Wijenayake, D. H. Braun, M. L. Gasperi, T. P. Gilmore, D. C. Pixler // Proc. 32nd IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 5-9 October 1997. – New Orleans, Louisiana (USA). – Vol. 2. – P. 1052-1057.
4. Gasperi, M. L. Life prediction modeling of bus capacitors in AC variable-frequency drives / M. L. Gasperi // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2005. – Vol. 41. – No. 6. – P. 1430-1435.
5. A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies / E. C. Aeloiza, J.-H. Kim,

- P. N. Enjeti, P. Ruminot // Proc. 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '05). – 12-16 June 2005. – Recife (Brazil). – P. 2867-2872.
6. Abo-Khalil, A. G. DC-link capacitance estimation in AC/DC/AC PWM converters using voltage injection / A. G. Abo-Khalil, D.-C. Lee // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2008. – Vol. 44. – No. 5. – P. 1631-1637.
7. Amaral, A. M. R. Using a sinusoidal PWM to estimate the ESR of aluminum electrolytic capacitors / A. M. R. Amaral, A. J. M. Cardoso // Proc. 2nd International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG '09). – 18-20 March 2009. – Lisbon (Portugal). – P. 691 – 696.
8. Pang, H. M. A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor / H. M. Pang, P. M. H. Bryan // Proc. 25th IEEE Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2010). – 21-25 February 2010. – Palm Springs, California (USA). – P. 973 – 979.
9. Zhao, K. Lifetime analysis of aluminum electrolytic capacitor subject to voltage fluctuations / K. Zhao, P. Ciufo, S. Perera // Proc. 14th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2010). – 26-29 September 2010. – Bergamo (Italy).
10. Fault diagnosis of dc-link capacitors in three-phase AC/DC PWM converters by online estimation of equivalent series resistance [Text] / X.-Si Pu, T. H. Nguyen, D.-C. Lee, K.-B. Lee, J.-M. Kim // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60. – No. 9. – P. 4118-4127.
11. Buiatti, G. M. Lifetime of film capacitors in single-phase regenerative induction motor drives [Text] / G. M. Buiatti, S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso // Proc. 6th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED 2007). – 6-8 September 2007. – Cracow (Poland). – P. 356-362.
12. Горпинич, А. В. Оценка надёжности силовых конденсаторов при искажении кривой питающего напряжения / А. В. Горпинич, И. И. Трубникова // Университетская наука-2011: междунар. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Мариуполь: ПГТУ, 2011. – Т.2. – С. 6.
13. Горпинич, А. В. Влияние высокочастотных составляющих на нагрев конденсаторов с самовосстанавливающейся изоляцией [Текст] / А. В. Горпинич, И. И. Трубникова // Университетская наука-2012 : междунар. науч.-техн. конф.: тезисы докл. – Мариуполь: ПГТУ, 2012. – Т.2. – С. 75-76.
14. AVX medium power film capacitors [Электронный ресурс] / AVX Corporation, 2013. – Режим доступа: <http://www.avx.com/docs/catalogs/ffve-ffvi.pdf>

Ключові слова: електромагнітна сумісність, частотно-регульований електропривод, конденсатор ланки постійного струму.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, частотно-регулируемый электропривод, конденсатор звена постоянного тока.

Keywords: electromagnetic compatibility, variable-frequency drive, dc-link capacitor.

Надійшла до редколегії 10.11.2012