

В. В. БУШЕР, О. В. ГЛАЗЕВА

ДОСЛІДЖЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ТА АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Використання високовольтних перетворювачів частоти є одними з найперспективніших напрямків в розробці сучасних систем суднового електропостачання завдяки їх підвищеній надійності, економічній доцільності, підвищеній якості вихідної електроенергії, що дозволяє збільшити термін служби і якість регулювання потужних суднових електроприводів. В роботі виконано аналіз багаторівневих каскадних АІН на основі моделі в середовищі Matlab/SimPowerSystem. Дослідження електромагнітних процесів та спектрального складу вихідної напруги та струму показало, що THD як за струмом, так і за напругою стають кращими при використанні 5-рівневої системи порівняно з 3-рівневою, що свідчить про доцільність з цього критерію збільшення кількості рівнів. Частота модуляції має великий вплив на THD за струмом і пульсації електромагнітного моменту, в зв'язку з чим її правильний вибір з урахуванням припустимого перегріву транзисторів має важливу роль при проектуванні АІН. Також для підвищення перевантажувальної спроможності за моментом та коефіцієнту використання перетворювача за потужністю доцільно до синусоїдальної складової додавати третю гармоніку з амплітудою 1/6 від основної. Незважаючи на незначне погіршення THD діюче значення вихідної фазної напруги зростає майже на 16 % за рахунок чого електродвигун може розганятися швидше, що важливо для суднових агрегатів, насамперед підрулюючих пристроїв. В роботі показано доцільність використання методу балансування лінійних напруг, що при пошкодженні однієї або кількох секції забезпечує продовження функціонування АІН з максимальним використанням потужності і є найважливішою рисою каскадних АІН, особливо для живучості суден.

Ключові слова: багаторівневий високовольтний перетворювач частоти, автономний інвертор напруги, коефіцієнт несинусоїдальності, каскадний АІН, скалярна ШІМ, метод балансування лінійних напруг.

В. В. БУШЕР, О. В. ГЛАЗЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУДОВЫХ ВИСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Применение высоковольтных преобразователей частоты является одним из самых перспективных направлений в разработке современных систем судового электроснабжения благодаря их повышенной надёжности, экономической целесообразности, повышенному качеству выходной электроэнергии, что позволяет увеличить срок службы и качество регулирования мощных судовых электроприводов. В работе выполнен анализ многоуровневых каскадных АИН на основе модели в среде Matlab / SimPowerSystem. Исследование электромагнитных процессов и спектрального состава выходных напряжений и токов показало, что THD как по току, так и по напряжению становятся лучшими при использовании 5-уровневой системы по сравнению с 3-уровневой, что свидетельствует о целесообразности по этому критерию увеличения количества уровней. Частота модуляции имеет большое влияние на THD по току и пульсации электромагнитного момента, в связи с чем её правильный выбор с учётом допустимого перегрева транзисторов имеет важную роль при проектировании АИН. Также для повышения перегрузочной способности по моменту и коэффициента использования преобразователя по мощности целесообразно к синусоидальной составляющей напряжения добавлять третью гармонику с амплитудой 1/6 от основной. Несмотря на незначительное ухудшение THD, действующее значение выходного фазного напряжения возрастает почти на 16%, за счёт чего электродвигатель может разгоняться быстрее, что важно для судовых агрегатов, прежде всего для подруливающих устройств. В работе показана целесообразность использования метода балансировки линейных напряжений, что при повреждении одной или нескольких секции обеспечивает продолжение функционирования АИН с максимальным использованием мощности и является важнейшей чертой каскадных АИН, особенно значимой для живучести судов.

Ключевые слова: многоуровневый высоковольтный преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, коэффициент несинусоидальности, каскадный АИН, скалярная ШИМ, метод балансировки линейных напряжений.

V. V. BUSER, O. V. GLAZEVA

RESEARCH OF HIGH-VOLTAGE FREQUENCY CONVERTERS IN SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS

The use of high-voltage frequency converters is one of the most promising areas in the development of modern marine power supply systems, due to their increased reliability, economic feasibility, improved quality of output electricity, which allows to increase the service life and quality of regulation of powerful marine electric drives. In this paper, an analysis of multilevel cascade FC based on a Matlab / SimPowerSystem model is performed. A study of electromagnetic processes and the spectrum of the output voltage and current showed that THD both in current and in voltage becomes better when using a 5-level system compared to a 3-level system, which indicates the expediency of increasing the number of levels according to this criterion. The modulation frequency has a great influence on THD in current and pulsation of the electromagnetic torque, and therefore its correct choice, taking into account the permissible overheating of transistors, has an important role in the design of FC. It is also advisable to add a third harmonic with an amplitude of 1/6 of the main to the sinusoidal component of the voltage to increase the overload capacity. Despite a slight deterioration in THD, the RMS of the output phase voltage rises by almost 16%, due to which the electric motor can accelerate faster, which is important for marine units, especially for thrusters. The paper also shows the feasibility of using the method of balancing linear stresses in case when one or several cells are damaged, ensures the continued operation of the FC with the maximum use of power and is an important feature of cascading FC, especially significant for the survivability of ships.

Keywords: multi-level high-voltage frequency converter, autonomous voltage inverter, total harmonic distortion, cascaded FC, scalar PWM, linear voltage balancing method.

Вступ. Впровадження високовольтного регульованого електроприводу в морській індустрії є одним з основних напрямків зменшення споживання електроенергії та підвищення EEDI (Energy Efficiency Design

Index – Спроекований Індекс Енергоефективності) та EEOI (Energy Efficiency Operational Index – Експлуатаційний Індекс Енергоефективності), які є одними з найголовніших параметрів при проектуванні та виготовленні сучасного судна [1].

© В. В. Бушер, О. В. Глазева, 2020

Використання перетворювачів частоти (ПЧ) є найбільш економічним способом плавного автоматичного регулювання швидкості обертання і продуктивності електроприводу, що дозволяє більш ефективно забезпечити:

- енергозберігаючі режими, так як асинхронний двигун (АД) отримує від мережі рівно стільки енергії, скільки потрібно для оптимальної роботи з максимальним ККД;
- стабілізацію параметрів.
- надійність експлуатації агрегатів, їх ресурс при зниженні витрат на технічне обслуговування і ремонт;
- екологічність, електромагнітну сумісність та інтеграцію в АСЕУ.

Аналіз проблеми. Потужні високовольтні перетворювачі частоти (ВПЧ) застосовуються в судновій електроенергетиці головним чином в складі електроприводів підрулюючих пристроїв, електроруху, приводах потужних вентиляторів і насосів.

В даний час найбільшого поширення набули перетворювачі частоти для керування швидкістю обертання високовольтних двигунів за такими схемами [2]

1. ВПЧ, побудований за двохрансформаторною схемою з низьковольтною ланкою постійного струму.
2. ВПЧ, побудований за структурою багаторівневого перетворювача з вхідним секційним трансформатором.
3. ВПЧ, побудований за структурою каскадного перетворювача із вхідним секційним трансформатором.

Огляд багаторівневих інверторів, що існують (рис. 1) дозволив виявити, що найбільш поширено використання наступних систем [3]:

- АІН з обмежувачими діодами («diode-clamped converter») або з фіксованою нульовою точкою («neutral point clamped»);

- АІН з плаваючими або навісними конденсаторами («floating-capacitor converter»);
- каскадний АІН («cascaded H-bridge converter»).

Найбільш перспективними є АІН, що побудовано за каскадною схемою (рис. 2, 3) [4]. За цією структурою можна досягти будь-яких високих рівнів вихідної напруги, використовуючи тільки стандартні низьковольтні технологічно сформовані компоненти. Високий ступінь модульності дозволяє збільшити працездатність без відключення навантаження навіть в разі несправності в одному або декількох з модулів.

Особливості каскадних АІН:

- висока якість вихідної напруги і струму;
- багаторівнева схема формування вихідної напруги забезпечує синусоїдальну форму вихідного струму;
- хороша електромагнітна сумісність з системою електропостачання;
- необхідність живлення кожного модулю індивідуальним джерелом постійної напруги;
- підвищена надійність роботи;
- відсутність необхідності установки вихідних фільтрів;
- потужність від сотень кіловат до десятків мегават.

Топологія і принципи управління інверторами визначаються сучасними силовими напівпровідниковими елементами нового типу (IGBT, GTO, IGCT, SGCT), а також різними видами широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [5,6].

Для формування напруги на виході багаторівневих АІН використовують різні алгоритми ШІМ. Найбільшого поширення набула класифікація алгоритмів управління АІН, яка заснована на наявності або відсутності високочастотного несучого сигналу порівняння:



Рис. 1. Топології багаторівневих інверторів

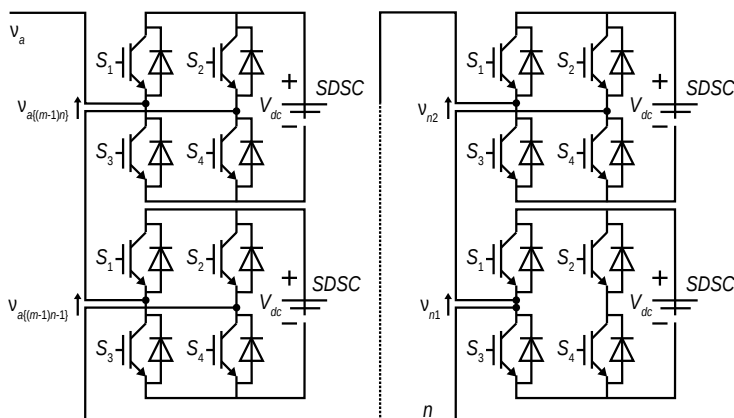


Рис. 2. Одна фаза каскадного Н-моста багаторівневого інвертора

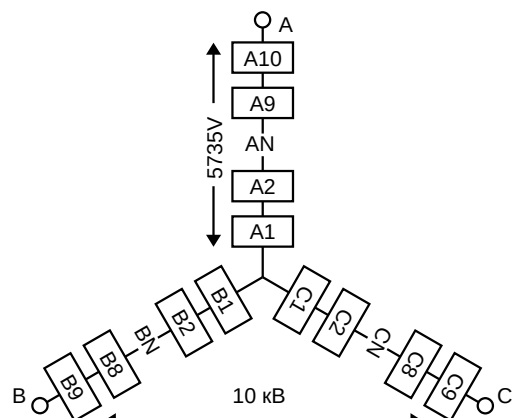


Рис. 3. Використання низьковольтних модулів для формування напруги понад 1000 В

- синусоїдальна (скалярна) ШІМ;
- модифіковані алгоритми синусоїдальної ШІМ;
- ШІМ зі змінними параметрами;
- просторово-векторна ШІМ;
- алгоритм виключення окремих гармонік;
- вейвлет-модуляція та ін.

На практиці найбільшого поширення в силу простоти реалізації отримали алгоритми скалярної ШІМ.

Для багаторівневих ПЧ одним з найкритичніших режимів є режим роботи при виході з ладу силового модуля в однієї з фаз інвертора. Байпасування при цьому силового модуля інвертору небезпечно виникненням перекоосу напруг по фазах, дисбалансом струмів в навантаженні.

АІН, побудований за каскадною схемою, має підвищену надійність порівняно з іншими топологіями побудови тому, що на випадок відмови однієї з секцій, застосовують обхідний контактор який здатний зберегти працездатність з частковою втратою потужності. При виникненні аварії цей контактор є шунтом, який виключає секцію з послідовного кола, при цьому справні секції продовжують працювати [7,8].

Простий обхід секції призводить до значного погіршення якості струмів із за виникнення несиметрії напруги живлення, а значить, погіршення умов роботи навантаження – АД. Тому в каскадних ПЧ використовують різні методи управління в аварійних режимах. Так, в ПЧ Allen Bradley HV FC 6000 після виявлення дефекту секції в однієї фази замикаються одноім'яні секції в двох інших фазах. Це призводить до втрати напруги на величину U_{ϕ} / n , де n – кількість секцій в однієї фази [9]. В ПЧ SIEMENS серії Robicon PERFECT HARMONY використовують метод балансування лінійних напруг [10].

Метою даної роботи є дослідження принципів формування багаторівневої вихідної напруги ВПЧ та вибір найкращого методу підвищення електромагнітної сумісності з потужним АД в нормальних та аварійних режимах. Для реалізації зазначеної мети в роботі вирішено наступні завдання:

- проведено аналітичний огляд типових структур високовольтних перетворювачів частоти;
- побудовано моделі багаторівневих перетворювачів модульного типу;
- проведено спектральний аналіз струмів статора потужного АД при його роботі з 3-рівневим та 5-рівневим каскадними перетворювачами;
- дослідження скалярних алгоритмів формування ШІМ на виході каскадного АІН;
- розроблено алгоритм формування ШІМ п'ятирівневим АІН при пошкодженні однієї або двох секцій АІН.

Матеріали дослідження. Для побудови моделі каскадного багаторівневого ПЧ, який працює на потужний АД, використано метод математичного моделювання в середовищі Matlab (рис. 5) [11,12].

Вихідними даними для моделювання використано параметри схеми заміщення потужного АД марки АBB/AMD710X6T VABM, технічні характеристики якого наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики АД марки АBB / AMD710X6T VABM

Номінальна потужність, МВт	2,1
Напруга, В	10000
Частота, Гц	50
Частота обертання, об/хв	995
Струм, А	139
Коефіцієнт потужності	0,9
Номінальний момент, Н·м	20145
Відносний пусковий струм	6,7
Відносний пусковий момент	0,8
Відносний максимальний момент	2,5
Параметри схеми заміщення	
Опір статору R1 (120°C)	0,3047
Реактивність статору X1	5,2670
Опір ротору R2' (40°C)	0,2030
Реактивність ротору X2'	3,2926

Параметри ВПЧ:

1. Структура АІН: каскадна схема з живленням кожного Н-моста від трансформатора з розщепленою вторинною обмоткою;

2. Метод ШІМ: скалярна ШІМ та модифікована скалярна ШІМ;

3. Частота ШІМ: 1000 / 4000 Гц;

4. Число рівнів вихідної напруги: 3 і 5 відповідно для 3-рівневого і 5-рівневого перетворювачів;

5. Елементна база модулів: IGBT-транзистори з паралельно включеними діодами зворотного струму.

Блок управління (рис. 4) дозволяє в залежності від завдання реалізувати два алгоритми формування ШІМ. Перший алгоритм – з фазовим зміщенням синусоїдальних та амплітудним зрушенням трикутних сигналів (рис. 5,а); другий – з додаванням третьої гармоніки з амплітудою $1/6 U_m$ в синусоїдальні сигнали фазних напруг (рис. 5,б) [13,14].

У таблиці 2 вказано THD напруги і струму в фазі АД при його роботі від 3-х і 5-рівневого АІН. Співставлено, за умови живлення від ідеальних джерел постійного струму, гармонійний склад при різних частотах комутації IGBT-транзисторів та різних методах ШІМ – синусоїдальної та синусоїдальної з додаванням третьої гармоніки.

Таблиця 2 – Порівняльні результати розрахунків

ШІМ, %	THD	Рівень ВПЧ	
		3	5
синусоїдальна	THD _I	0,99	0,55
	THD _U	35,54	21,73
з додаванням 3-ї гармоніки – 4000 Гц	THD _U	30,56	23,2
	THD _I	1,01	0,65
з додаванням 3-ї гармоніки – 1000 Гц	THD _U	30,49	23
	THD _I	5,99	5,43

Видно, що підвищення кількості рівнів у АІН призводить до покращення THD за струмом та напругою. Однак в разі 5-рівневого АІН потрібна більша кількість ізольованих джерел постійного струму, ніж в 3-рівневному, що впливає на вартість ВПЧ.

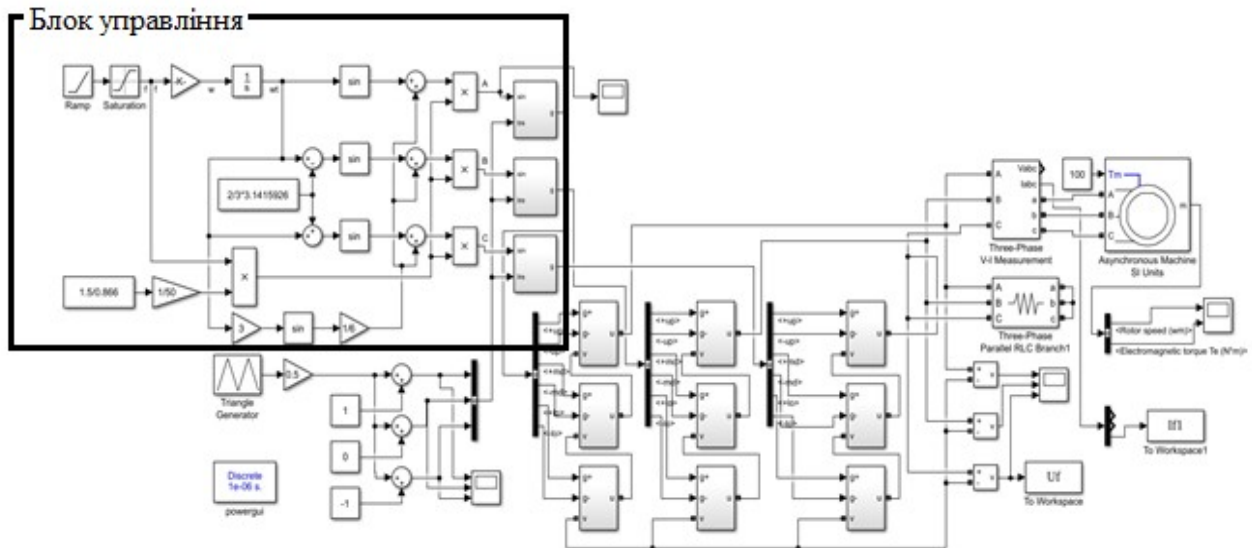


Рис. 4. Модель 3-рівневого перетворювача

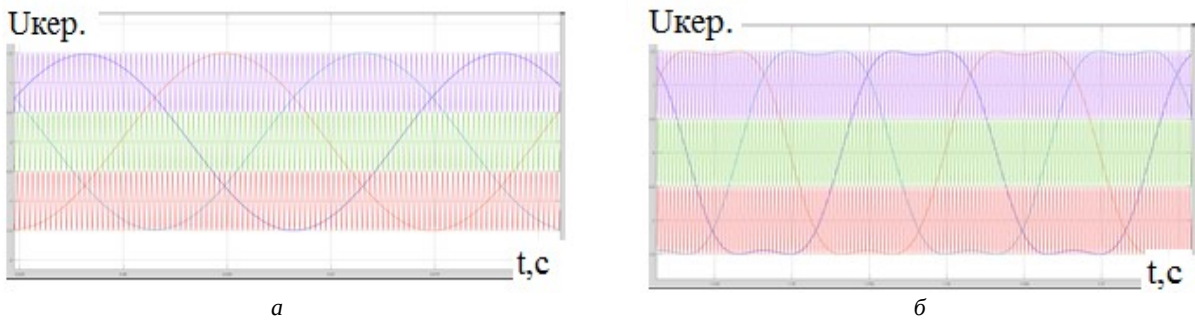


Рис. 5. Задані синусоїдальні і пилкоподібні сигнали для отримання 3-рівневого АІН:
а – при синусоїдальній ШІМ; б – ШІМ з додаванням 3-ї гармоніки

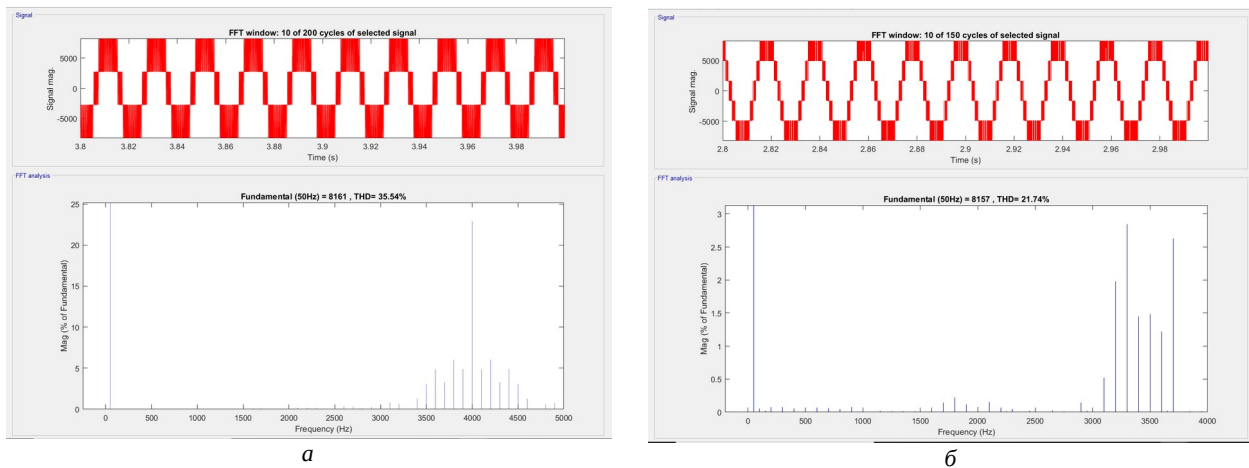


Рис. 6. Часові діаграми та спектри фазних напруг: а – на виході 3-рівневого АІН; б – на виході 5-рівневого АІН

Підвищення частоти модуляції до технічно можливого рівня значно знижує пульсації електромагнітного моменту АД (рис. 7), що позитивно впливає на його роботу [11]. Додавання третьої гармоніки призводить до зростання фазної напруги на 16 % та відповідного зростання критичного моменту АД, що робить цей метод керування досить перспективним для використання, особливо для електроприводів, що по-

требують високої швидкодії, насамперед для підрулюючих установок.

За допомогою розробленої моделі було розглянуто аварійний режим роботи 5-рівневого АІН при відмові однієї з секцій у фазі «А» (рис. 8). Алгоритм, застосований для нормалізації роботи, засновано на аналізі діаграм лінійних та фазних напруг, які створює АІН в нормальному і аварійному режимах (рис. 9).

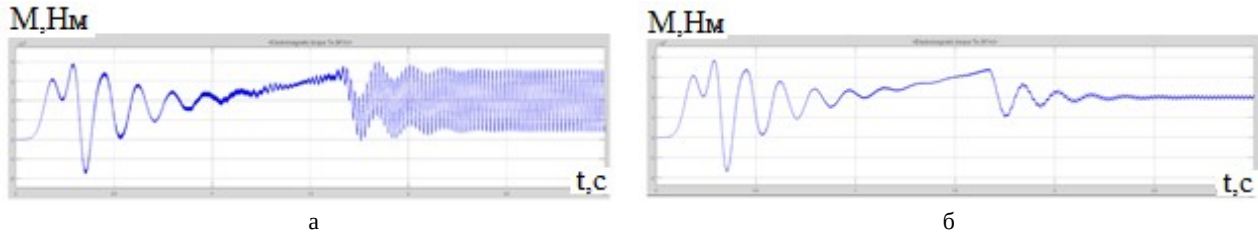


Рис. 7. Характеристика зміни електромагнітного моменту трифазного АІН з СПМ:
а – частота модуляції $f_{\text{опор.}} = 1000$ Гц ; б – частота модуляції $f_{\text{опор.}} = 4000$ Гц

Згідно з даним методом підбір кутів зсуву між фазними напругами зміщує нейтраль та дає можливість підтримувати збалансованими лінійні напруги АІН. Для розрахунку міжфазних кутів α , β , γ в аварійному режимі необхідно забезпечити рівність всіх трьох лінійних напруг.

$$\begin{cases} U_A^2 + U_B^2 - 2 U_A U_B \cos(\alpha) = U_B^2 + U_C^2 - 2 U_B U_C \cos(\beta); \\ U_A^2 + U_B^2 - 2 U_A U_B \cos(\alpha) = U_C^2 + U_A^2 - 2 U_C U_A \cos(\gamma); \\ \alpha + \beta + \gamma = 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

де U_A, U_B, U_C – модулі напруг кожної фази;
 $\alpha = \angle(U_A, U_B), \beta = \angle(U_B, U_C), \gamma = \angle(U_C, U_A)$.

Якщо прийняти, що одна секція створює напругу рівну 1 в.о. (відносна одиниця), тоді усі фазні напруги будуть дорівнювати 5 в.о. (для 5-рівневого АІН), а лінійні відповідно $5 \cdot \sqrt{3} \approx 8,66$ в.о.,

$$\begin{aligned} U_A = U_B = U_C &= 5 \text{ в.о.}, \\ U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} &= 5 \cdot \sqrt{3} \approx 8,66 \text{ в.о.} \end{aligned}$$

В аварійному режимі напруга фази А: $U_A = 4$ в.о.
Тоді, рівняння (1) перетворюється до виду:

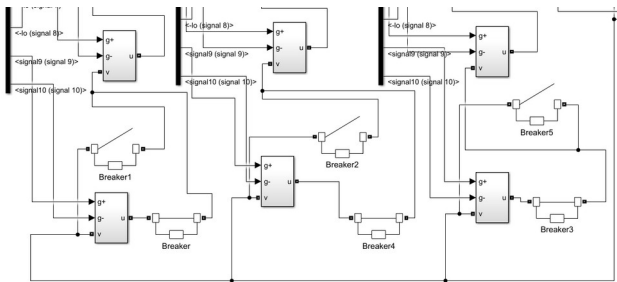


Рис. 8. Обхідні контактори секцій каскадної схеми

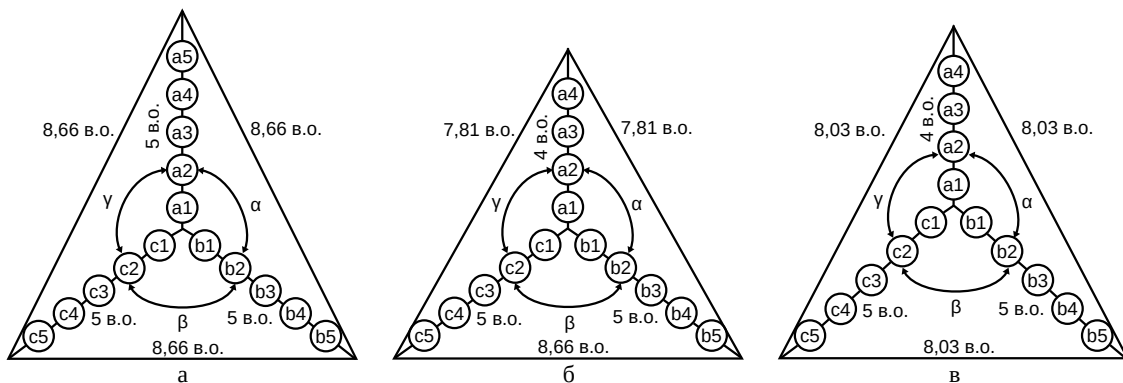


Рис. 9. Векторні діаграми 5-рівневого АІН при роботі у:
а – нормальному режимі; б – аварійному режимі; в – аварійному режимі з компенсацією

$$\begin{cases} 4^2 + 5^2 - 2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot \cos(\alpha) = 5^2 + 5^2 - 2 \cdot 5 \cdot 5 \cdot \cos(\beta) \\ 4^2 + 5^2 - 2 \cdot 4 \cdot 5 \cdot \cos(\alpha) = 5^2 + 5^2 - 2 \cdot 5 \cdot 4 \cdot \cos(\gamma) \\ \alpha + \beta + \gamma = 2\pi \end{cases}$$

Рішення системи рівнянь (2) дає наступне значення кутів:

$$\alpha = \gamma = 126^\circ, \beta = 360 - 2 \cdot 126 = 108^\circ$$

З такими кутами лінійні напруги зменшуються лише на 7,27 % (рис. 9,в) на відміну від 20 % при використанні байпасування секцій в фазах В і С.

Перехідні характеристики моменту, фазних напруг та струмів при аварійному режимі (відмові однієї секції фази А) наведено на рис. 10: двигун розганяється до номінальної частоти обертання у нормальному режимі з 0 до 2 с, у момент часу 3 с імітується відмова однієї секції, а через 2с відбувається компенсація пошкодженої секції зсувом міжфазних кутів.

З графіків можна побачити, що при виході з ладу однієї з секцій в фазі А, в лінійних струмах та напругах виникає дисбаланс, який проявляється зміною амплітуд. При використанні модифікованого алгоритму керування, тобто зміни фазних кутів α, β, γ в системі вдалося досягти нового збалансованого стану. При зменшенні лінійних напруг на 7,27% жорсткість механічної характеристики двигуна зменшується на 14%, але АД зберігає свою працездатність (при байпасуванні жорсткість зменшується на 36%). Використовуючи закон пропорційної залежності між частотою та напругою можна відновити жорсткість механічної характеристики якщо за умовами технологічного процесу припустимо зменшення частоти на 7,27%. Таким чином, використання багаторівневого каскадного АІН здатне не тільки забезпечити високу якість напруги живлення АД, а й підвищити надійність системи.

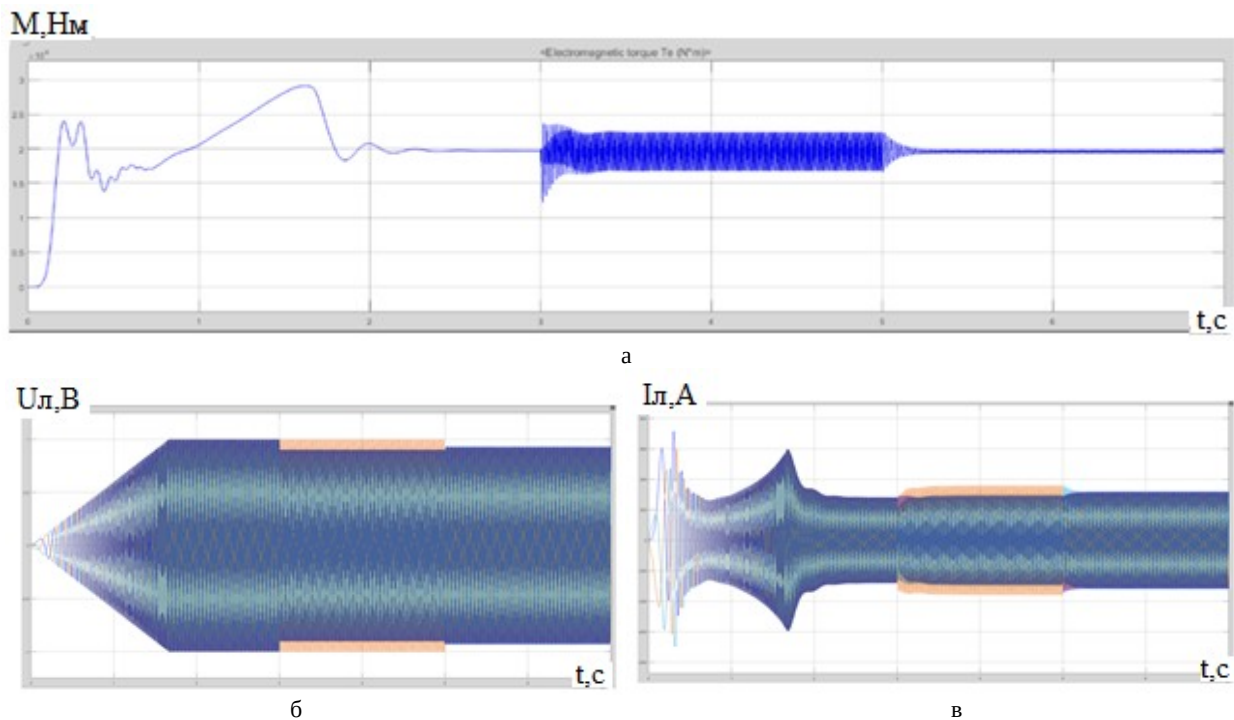


Рис. 10. Графіки на виході АІН в аварійному режимі: а – електромагнітного моменту АД; б – лінійних напруг; в – струмів

Висновки. За допомогою розробленої моделі виконано дослідження електромагнітних процесів та спектрального складу вихідної напруги та струму в багаторівневих АІН, проведено аналіз енергетичних характеристик при роботі на потужний АД. Показано, що THD як за струмом так і за напругою стають кращими при використанні 5-рівневої системи порівняно з 3-рівневою, що свідчить про доцільність з цього критерію збільшення кількості рівнів.

THD при використанні ШІМ з додаванням третьої гармоніки стає гіршим як для 3-рівневої так і для 5-рівневої системи, але замість цього зростає діюче значення вихідної фазної напруги майже на 16 %, відповідно зростає і критичний момент АД, за рахунок чого електродвигун може розігнатися швидше, що робить даний метод керування досить перспективним для використання.

Частота модуляції має великий вплив на THD за струмом, в зв'язку з чим її правильний розрахунок має важливу роль при проектуванні АІН.

Кожних з цих параметрів тим чи іншим способом впливає на THD_I та THD_U які є головними критеріями оцінки якості електроенергії що впливають на підвищення EEDI та EEO. Також, використання багаторівневого АІН з методом балансування лінійних напруг підвищує надійність електроприводу та живучість суднових електроенергетичних систем.

Список літератури

- Глазева О.В., Власов В.Б. Применение высоковольтных преобразователей частоты как метод повышения индекса энергоэффективности на объектах морской индустрии. Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: Матеріали наук-метод. конф. 05 – 06 грудня 2018. Одеса: НУ «ОМА», 2018. С. 70 – 78.
- Кузькин В.И., Мелешкин В.Н., Мясцев С.В., Симоненков Д.В., Шипаева С.Н. Высоковольтный преобразователь частоты для питания асинхронных двигателей. *Электротехника*. Москва: Акционерное общество «Фирма Знак». 2004, №10. С. 19 – 24.
- Бурдасов Б.К., Нестеров С.А., Федотов Ю.Б. Преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока. *APRIORI. Сер.: Естественные и технические науки: электрон. науч. журн.* Краснодар: Индивидуальный предприниматель Акелян Нарине Самадовна. 2015, №4. 9 с. <http://apriori-journal.ru> (дата обращения 15.10.2020).
- Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J., Perez M. A. Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, N7. pp. 2197 – 2206.
- McGrath B.P. Holmes D.G. Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49, N4. pp.858 – 867.
- Holmes D.G., Lipo T.A. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 744 p.
- Высоковольтный преобразователь частоты HYUNDAI серии N5000. URL: <https://kamelectro.com/catalogue/special-places/preobrazovateli-chastoty/hyundai/n5000/>. (дата обращения 05.01.2020)
- Преобразователи частоты 6-10 кВт VEDADRIVE 315–25000 кВА. URL: <http://www.aksprom.biz/Catalog/Danfoss/35589/Preobrazovateli-chastoty-6-10-kVt-VEDADRIVE-315-25000-kVA>. (дата обращения 10.01.2020).
- PowerFlex 6000 Medium Voltage Variable Frequency Drive Firmware, Parameters, and Troubleshooting Manual: Catalog Number 6000G. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/6000-td004_en-p.pdf. (дата обращения 10.01.2020).
- Высоковольтные преобразователи частоты Robicon PERFECT HARMONY 225кВт – 120МВт. URL: https://driveka.ru/upload/iblock/7b5/perfect_harmony_ru_2008.pdf. (дата обращения 11.01.2020).
- Бушер В.В., Глазева О.В., Морозов К.О., Космас Здрозис. Дослідження високовольтних перетворювачів частоти в суднових електроенергетичних системах. Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: Матеріали наук-метод. конф. 05 – 06 листопада 2019. Одеса: НУ «ОМА», 2020. С. 231 – 237.
- Krishnapriya S., Unnikrishnan L. Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drives. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 04, Issue 09. pp. 60 – 64.

13. Колпаков А., Карташев Е. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями. *Силовая электроника*. Санкт-Петербург: «ЗАО Медиа Групп Файнстрит». 2009, № 2. С. 57-65
 14. Manimala V., Geetha N., Renuga P. Design and simulation of five level cascaded inverter using multilevel sinusoidal pulse width modulation strategies. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. Kanyakumari, India, 2011. pp. 280 – 283.
- References (transliterated)**
1. Glazeva O.V., Vlasov V.B. Primenenie vysokovol'tnykh preobrazovatelej chastoty kak metod povysheniya indeksa energoeffektivnosti na ob'ektakh morskoy industrii [The use of high-voltage frequency converters as a method of increasing the energy efficiency index at the marine industry]. *Sudnova elektrozhenneriya, elektronika i avtomatyka: Materialy nauk-metod. konf. 05 – 06 hrudnia 2018 r., Odesa* [Marine Engineering, Electronics and Automation: Materials of the Scientific and Methodological Conference 05-06 December 2018]. Odesa: NU «OMA», 2019. pp. 70 – 78.
 2. Kuz'kin V.I., Meleshkin V.N., Myasishchev S.V., Simonenkov D.V., SHipaeva S.N. *Vysokovol'tnyj preobrazovatel' chastoty dlya pitaniya asinhronnykh dvigatelej* [High voltage inverter for powering induction motors]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering]. Moskva: Akcionerное obshchestvo «Firma Znak». 2004, №10. pp. 19 – 24.
 3. Burdasov B.K., Nesterov S.A., Fedotov YU.B. *Preobrazovately chastoty dlya vysokovol'tnykh elektroprivodov peremennogo toka* [Frequency converters for high voltage ac motor drives]. *APRIORI. Ser.: Estestvennye i tekhnicheskie nauki: Elektronnyj nauchnyj zhurnal* [APRIORI. Series: Natural and technical sciences: Electronic scientific journal]. Krasnodar: Individual'nyj predprinimatel' Akelyan Narine Samadovna. 2015, №4. 9 p. <http://apriori-journal.ru> (accessed 15.10.2020).
 4. Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J., Perez M. A. Survey on Cascaded Multilevel Inverters. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 2010, vol. 57, N7. pp. 2197 – 2206.
 5. McGrath B.P. Holmes D.G. Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49, N4. pp.858 – 867.
 6. Holmes D.G., Lipo T.A. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 744 p.
 7. *Vysokovol'tnyj preobrazovatel' chastoty HYUNDAI serii N5000* [HYUNDAI N5000 Series High Frequency Inverter]. URL: <https://kamelectro.com/catalogue/special-places/preobrazovately-chastoty/hyundai/n5000/>. (accessed 05.01.2020).
 8. *Preobrazovately chastoty 6-10 kVt VEDADRIVE 315–25000 kVA* [Frequency inverters 6-10 kW VEDADRIVE 315-25000 kVA]. URL: <http://www.aksprom.biz/Catalog/Danfoss/35589/Preobrazovately-chastoty-6-10-kVt-VEDADRIVE-315-25000-kVA>. (accessed 10.01.2020).
 9. *PowerFlex 6000 Medium Voltage Variable Frequency Drive Firmware, Parameters, and Troubleshooting Manual: Catalog Number 6000G*. URL: https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/6000-td004_-en-p.pdf. (accessed 10.01.2020).
 10. *Vysokovol'tnye preobrazovately chastoty Robicon PERFECT HARMONY 225kVt – 120MVt* [High voltage frequency converters Robicon PERFECT HARMONY 225kW - 120MW]. URL: https://driveka.ru/upload/iblock/7b5/perfect_harmony_ru_2008.pdf. (accessed 11.01.2020).
 11. Busher V.V., Glazeva O.V., Morozov K.O., Kosmas Zdrozis. Doslidzhennya visokovol'tnykh peretvoryuvachiv chastoty v sudnovykh elektroenergetichnykh sistemah [Research of high-voltage frequency converters in ship electric power systems]. *Sudnova elektrozhenneriya, elektronika i avtomatyka: Materialy nauk-metod. konf. 05 – 06 lystopada 2019 r., Odesa* [Marine Engineering, Electronics and Automation: Materials of the Scientific and Methodological Conference 05-06 November 2019]. Odesa: NU «OMA», 2020. С. 231 – 237.
 12. Krishnapriya S., Unnikrishnan L. Multilevel Inverter Fed Induction Motor Drives. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 04, Issue 09. pp. 60 – 64.
 13. Kolpakov A., Kartashev E. *Algoritmy upravleniya mnogourovnevnyimi preobrazovatelyami* [Multilevel Converter Control Algorithms]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. Sankt-Peterburg: «ZAO Media Gruppy Fajnstrit». 2009, № 2. S. 57-65
 14. Manimala V., Geetha N., Renuga P. Design and simulation of five level cascaded inverter using multilevel sinusoidal pulse width modulation strategies. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. Kanyakumari, India, 2011. pp. 280 – 283.

Надійшла 10.02.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бушер Віктор Володимирович (Бушер Виктор Владимирович, Victor Busher) – доктор технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», професор кафедри суднової електромеханіки і електротехніки; м. Одеса, Україна; e-mail: victor.v.bousher@gmail.com

Глазева Оксана Володимирівна (Глазева Оксана Владимировна, Oksana Glazeva) – кандидат технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри суднової електромеханіки і електротехніки; м. Одеса, Україна; e-mail: o.glazeva@gmail.com