

Ю.В. Ковальова

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ПЕРЕРИВИСТИХ СТРУМІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ТРИФАЗНИМ КЕРОВАНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ

Режим переривистого струму вентильних електроприводів постійного струму з'являється в інтервалах неробочого ходу механізмів. Розрахунок ємності конденсаторів фільтру виконується через діюче значення змінної складової випрямленої напруги і тому виникає завдання розробки аналітичної методики для її розрахунку через коефіцієнт пульсацій напруги з урахуванням кута керування, електромагнітної сталої часу якоря і струму навантаження. Вираз для розрахунку коефіцієнта пульсацій напруги з урахуванням впливаючих факторів, отриманий методом планування експерименту на основі комп'ютерного моделювання в програмному пакеті Simulink, дозволяє визначити ємність конденсаторів фільтрів і підвищити ефективність електромеханічного перетворення електроенергії за рахунок зниження змінної складової випрямленої напруги. Бібл. 6, табл. 7, рис. 5.

Ключові слова: тиристорний випрямляч, пульсації напруги, кут керування, переривистий струм.

Режим прерывистого тока вентильных электроприводов постоянного тока появляется в интервалах холостого хода механизмов. Расчет емкости конденсаторов фильтра выполняется через действующее значение переменной составляющей выпрямленного напряжения и поэтому возникает задача разработки методики для ее расчета через коэффициент пульсации напряжения с учетом угла управления, электромагнитной постоянной времени цепи якоря и тока нагрузки. Выражение для расчета коэффициента пульсации напряжения с учетом влияющих факторов, полученное методом планирования эксперимента на основе компьютерного моделирования в программном пакете Simulink, позволяет определить емкость конденсаторов фильтра и повысить эффективность электромеханического преобразования электроэнергии за счет снижения переменной составляющей. Библ. 6, табл. 7, рис. 5.

Ключевые слова: тиристорный выпрямитель, пульсации напряжения, угол управления, прерывистый ток.

Актуальність теми. В сучасних регульованих електроприводах постійного струму широко використовуються напівпровідникові (транзисторні, тиристорні) керовані випрямлячі.

В ведених мережею тиристорних випрямлячах, які зараз продовжують серійно вироблятися в Україні, мають місце режими переривистих струмів при неробочому ході двигуна. Переривисті струми зменшують коефіцієнт корисної дії двигуна, оскільки змінна складова струму не створює механічного моменту на валу.

Для згладжування випрямленої напруги використовують фільтри: активні або резонансні, які в своїй схемі мають конденсатор [1-4]. Для резонансних фільтрів ємність конденсатора визначається за умовою рівності енергій реактора і конденсатора

$$C = L \cdot \sum I_k^2 / \sum U_k^2, \quad (1)$$

де L – індуктивність реактора; I_k , U_k – діючі значення гармонічних складових струму і напруги.

З (1) випливає необхідність визначення діючого значення змінних складових випрямленої напруги, у тому числі, для режиму переривистих струмів.

Аналіз публікацій. Для визначення діючого значення змінних складових випрямленої напруги в режимі переривистих струмів необхідно вибрати узагальнюючий параметр, який не залежить від потужності двигуна. Таким параметром являється коефіцієнт пульсацій напруги K_{pU} [1-4]

$$K_{pU} = \sqrt{\sum U_k^2} / U_{d0} = \sqrt{U_{dD}^2 - U_{d0}^2} / U_{d0}, \quad (2)$$

де U_{d0} – середнє значення (постійна складова) випрямленої напруги, U_{dD} – діюче значення випрямленої напруги.

Тоді діюче значення змінних складових випрямленої напруги дорівнює

$$\sqrt{\sum U_k^2} = K_{pU} \cdot U_{d0}. \quad (3)$$

У відомій літературі, наприклад в [4], пропонується графоаналітичний метод визначення коефіцієнта пульсацій напруги для двигунів постійного струму лише для випадку його роботи з номінальним навантаженням та номінальною швидкістю. Але цей метод, з одного боку, досить незручний та громіздкий, а з іншого – створює певну похибку при розрахунках, оскільки, як правило, двигуни постійного струму працюють з навантаженням і швидкістю меншими від номінальних. Виходячи з цього, необхідно розробити більш зручний і більш точний метод визначення коефіцієнта пульсацій напруги для середніх значень навантаження і швидкості, якщо в процесі роботи останні змінюються в певному діапазоні. Сучасним підходом з визначення коефіцієнта пульсацій є метод комп'ютерного моделювання, але цей метод у відомих літературних джерелах досліджений недостатньо.

Мета роботи – методами комп'ютерного моделювання визначити залежність коефіцієнта пульсацій вихідної напруги трифазного керованого випрямляча в режимі переривистих струмів від кута керування і параметрів навантаження та розробити аналітичну методіку його розрахунку.

Результати досліджень. Складний характер залежності коефіцієнта пульсацій напруги від параметрів режиму виключає можливість її отримання в аналітичному вигляді. Тому цю залежність необхідно визначити експериментально з подальшою апроксимацією аналітичним поліномом методом планування експерименту. Оскільки двигуни постійного струму відносяться до класу детермінованих систем, то раціонально проводити комп'ютерний експеримент. Комп'ютерна модель трифазного керованого випрям-

© Ю.В. Ковальова

ляча (на прикладі тиристорного випрямляча) з двигуном постійного струму в програмному пакеті Simulink [5] представлена на рис. 1. Модель складається з наступних елементів: трифазна система напруг виконана на однофазних джерелах змінної напруги, трифазний тиристорний випрямляч з системою імпульсно-фазового керування, амперметри, вольтметри, блоки розрахунку постійних (середніх) складових та діючих

значень напруги і струму, дисплей та осцилограф. Постійна складова випрямленої напруги визначається блоком «Magnitude signal», а діюче значення – блоками «signal rms». Модель двигуна постійного струму представлена електрорушійною силою (ЕРС) якоря E_a , активним опором R_a та індуктивністю якоря L_a . ЕРС якоря представлена джерелом постійної напруги.

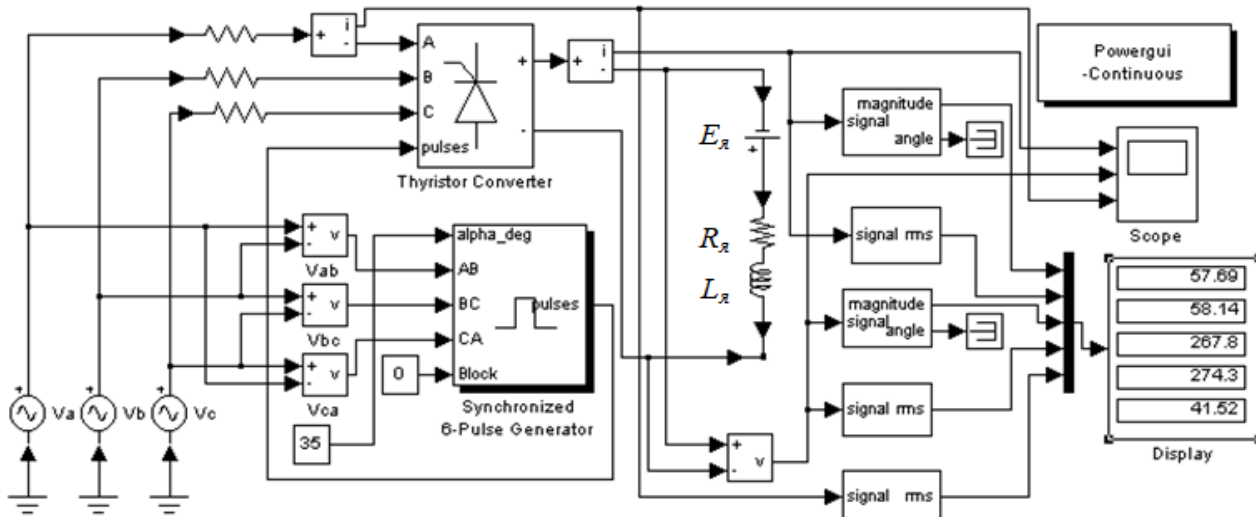


Рис. 1. Simulink-модель електроприводу постійного струму з тиристорним випрямлячем

Величина ЕРС якоря задається блоком E_a зі знаком «мінус», оскільки на схемі підключена не зустрічно напрузі випрямляча, що спричинено особливістю включення блоків в програмному пакеті Simulink. На рис. 2 показані отримані на моделі осцилограми напруги і струму обмотки якоря.

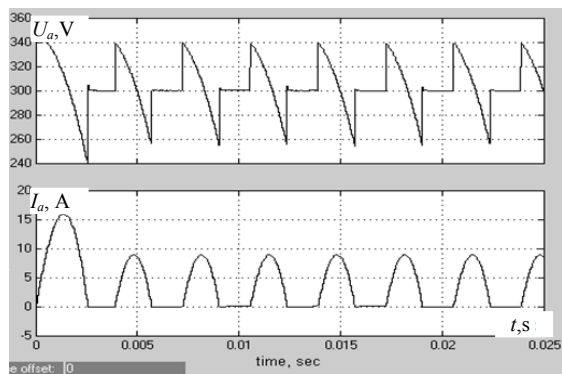


Рис. 2. Розрахункові осцилограми напруги і струму обмотки якоря

Згідно методу планування експерименту комп'ютерний експеримент проводимо наступним чином. Визначаємо залежності коефіцієнта пульсацій напруги окремо від кожного з впливаючих факторів (кут керування тиристорами, електромагнітна стала часу кола якоря та навантаження на валу двигуна) при стабілізації двох інших. Стабілізація постійної складової струму реалізується шляхом регулювання швидкості двигуна через відповідне регулювання ЕРС якоря методом ітерацій, тобто, послідовного наближення величини ЕРС до необхідної величини струму. Проведемо розрахунки коефіцієнта пульсацій напруги в режимі переривистих струмів для двигуна 4ПФ180М з такими параметрами $P=45$ кВт, $U=440$ В, $n=1060$ об/хв,

$I_{nom}=115$ А, $R_a=50$ мОм, $L_a=4$ мГн, $T_a=0,08$ с. Результати експериментів наведені в табл. 1-3.

Таблиця 1
Розрахунок залежності коефіцієнта пульсацій напруги від кута керування при $I_0 = \text{const} = 3,46$ А, $T_a = \text{const} = 0,08$ с

α , град	80	110	140
U_{d0} , В	318,9	304,2	280,8
U_{dD} , В	319,7	305,4	282,3
$\sqrt{\sum U_k^2}$, В	22,6	27,05	29,06
K_{pU}	0,07	0,09	0,1

Таблиця 2
Розрахунок залежності коефіцієнта пульсацій напруги від сталої часу при $I_0 = \text{const} = 3,46$ А, $\alpha = \text{const} = 110$ град

T_a , с	0,06	0,08	0,1
U_{d0} , В	308,7	304,2	300,2
U_{dD} , В	309,4	305,3	301,6
$\sqrt{\sum U_k^2}$, В	20,8	25,89	29,03
K_{pU}	0,07	0,09	0,1

Таблиця 3
Розрахунок залежності коефіцієнта пульсацій напруги від навантаження при $\alpha = \text{const} = 110$ град, $T_a = \text{const} = 0,08$ с

E_a , В	319,5	304	293,6
U_{d0} , В	319,6	304,2	293,9
U_{dD} , В	319,8	305,3	296
$\sqrt{\sum U_k^2}$, В	11,31	25,89	35,2
K_{pU}	0,04	0,08	0,12

За результатами досліджень побудовані відповідні графіки залежностей коефіцієнта пульсацій напруги від кута керування, електромагнітної сталої часу кола якоря і струму навантаження, які показані на рис. 3-5.

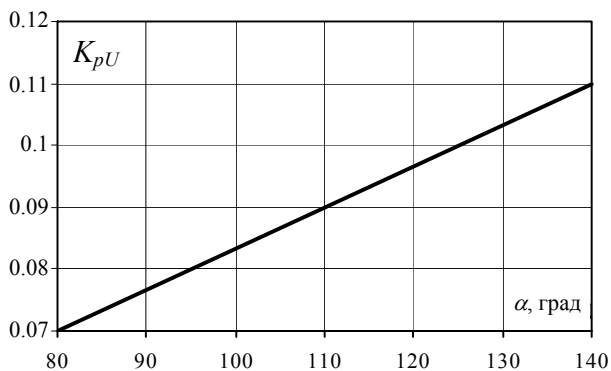


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта пульсацій напруги від кута керування

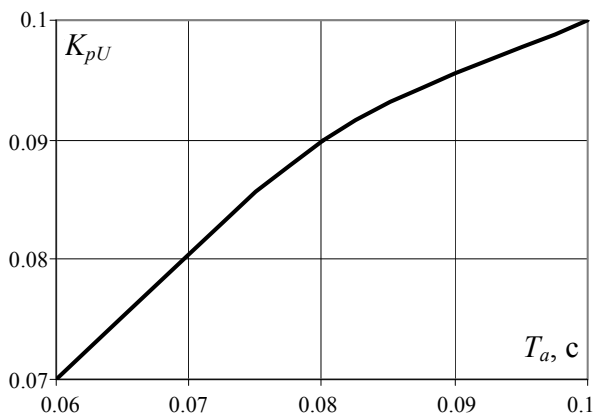


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта пульсацій напруги від електромагнітної сталої часу кола якоря

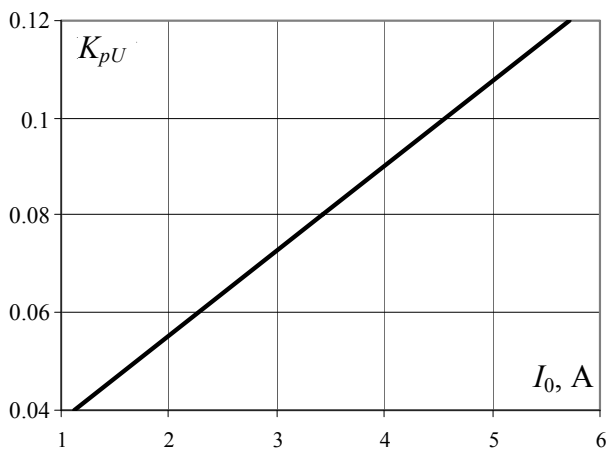


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта пульсацій напруги від струму навантаження

Для апроксимації залежності коефіцієнта пульсацій напруги від трьох впливаючих факторів застосуємо метод планування експерименту. Згідно методики [6] шукаємо поліном для розрахунку коефіцієнта пульсацій напруги у вигляді:

$$K_{pU} = b_0 + b_1\alpha + b_2T_a + b_3I_0^* + b_{12}\alpha T_a + b_{13}\alpha I_0^* + b_{23}T_a I_0^* + b_{123}\alpha T_a I_0^*, \quad (4)$$

де $I_0^* = I_0/I_{nom}$ – відносне значення постійної складової струму.

Значення факторів при повному експерименті, їх кодування та варіації наведені в табл. 4.

Таблиця 4
Величини факторів при повному факторному експерименті, їх кодування та варіації

α , град	80	110	140
T_a , с	0,06	0,08	0,1
L , Гн	0,003	0,004	0,005
I_0^*	0,01	0,03	0,05
I , А	1,15	3,45	5,75
Код факторів	-	0	+

Результати експерименту наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати повного факторного експерименту

№	E , В	U_{a0} , В	U_{ad} , В	$\sqrt{\sum U_k^2}$, В	K_{pU}
1	388	332,9	335	37,451	0,112
2	285	302,8	309,1	62,088	0,205
3	367	328,9	333,1	52,729	0,16
4	260	296,3	300,5	50,066	0,169
5	324,5	315,5	316,6	26,369	0,084
6	213	275,5	277,5	33,257	0,121
7	303,6	306,3	308,4	35,929	0,117
8	186,1	262,6	266,3	44,237	0,168
9	304,4	304,6	308,1	46,308	0,152

В результаті розрахунків коефіцієнтів полінома (4) отримана формула коефіцієнта пульсацій

$$K_{pU} = 0,142 + 0,024\alpha + 0,012T_a - 0,02I_0^* - 0,009\alpha T_a - 0,002\alpha I_0^* + 0,009T_a I_0^* + 0,012\alpha T_a I_0^*. \quad (5)$$

Визначимо похибку розрахункових значень коефіцієнта пульсацій напруги за формулою (5) відносно отриманих на моделі. Результати розрахунків похибки зведені в табл. 6.

Таблиця 6

Результати розрахунку відносної похибки

№ досліду	Точні значення	Розрахункові значення	Відносна похибка, %
1	0,112	0,16	-43
2	0,205	0,19	7
3	0,16	0,16	0
4	0,169	0,19	-12
5	0,084	0,16	-9
6	0,121	0,19	-57
7	0,117	0,16	-37
8	0,168	0,19	-13

Для розрахунку діючого значення пульсацій напруги треба задаватися відносними значеннями середньої швидкості і постійної складової напруги якоря $\omega_a^* = U_0^* = \omega_a/\omega_{nom} = U_0/U_{nom}^*$, які залежать від кута керування тиристорів. Залежність відносного значення постійної складової напруги якоря від кута керування, отримана на моделі і показана в табл. 7.

В результаті апроксимації регульовальної характеристики методом найменших квадратів [6] за даними табл. 7 отримуємо формули відносного значення постійної складової напруги та кута керування $U_{a0}^* = 0,831 - 0,077\alpha$, $\alpha = (0,831 - U_{a0}^*)/0,077$, де α – кут керування в радіанах.

Таблиця 7

Залежність відносного значення постійної складової напруги якоря від кута керування

Кут керування тиристорів, град	Відносне значення напруги якоря, U_{a0}^*
80	0,86
110	0,65
140	0,23

Таким чином, методика визначення діючого значення змінних складових напруги полягає у наступному:

1. Задаємо швидкість ω_a^* , розраховуємо U_{a0}^* і α ;
2. Задаємо момент навантаження і визначаємо відносне значення постійної складової струму $I_0^* = M_a / M_{ном}$;
3. Визначаємо коефіцієнт пульсацій напруги за формулою (5);
4. Визначаємо діюче значення змінної складової напруги за формулою (3).

Висновки.

На основі комп'ютерного моделювання розроблена аналітична методика розрахунку коефіцієнта пульсацій та діючого значення змінної складової випрямленої напруги в режимі переривистих струмів.

Запропонована методика дозволить раціонально визначити ємності конденсаторів фільтрів і підвищити ефективність електромеханічного перетворення електроенергії за рахунок зменшення змінної складової випрямленої напруги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Afonso J., Couto C., Martins J. Active filters with control based on p-q theory // IEEE Industrial Electronics Society Newsletter. – 2000. – vol.47. – no.3. – pp. 5-10.
2. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – vol.15. – no.4. – pp. 660-669. doi: 10.1109/63.849036.
3. Kovalova Y.V. Determination of the ripple factor of the voltage of single-phase thyristor rectifier // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – №3. – С. 4-7.
4. Сенько В.І. Силовая электроника. – Київ: ІЗМН, 1999. – 214 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. – Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2007. – 320 с.
6. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К.П. Власова – Харьков: Издательство «Гуманитарный центр», 2002. – 256 с.

REFERENCES

1. Afonso J., Couto C., Martins J. Active filters with control based on p-q theory. *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, 2000, vol.47, no.3, pp. 5-10.
2. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. An instantaneous active and reactive current component method for active filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, vol.15. no.4, pp. 660-669. doi: 10.1109/63.849036.
3. Kovalova Y.V. Determination of the ripple factor of the voltage of single-phase three sided rectifier. *Lighting engineering and power engineering*, 2016, no.3, pp. 4-7.

4. Sen'ko V.I. *Sylova elektronika* [Power electronics]. Kiev, IZMN Publ., 1999. 214 p. (Ukr).
5. German-Galkin S.G. *Komp'uternoe modelirovanie poluprovodnikovyx sistem v MATLAB 6.0* [Computer model of the semiconductor systems in MATLAB 6.0]. Saint Petersburg, CORONA Publ., 2007. 320 p. (Rus).
6. Vlasov K.P. *Metody issledovaniy i organizatsiia eksperimentov* [The method of investigation and organization experiments]. Kharkiv, Gumanitarnyi Center Publ., 2002. 256 p. (Rus).

Надійшла (received) 04.04.2018

Ковальова Юлія Вікторівна, к.т.н., ст. викладач,
Харківський національний університет
міського господарства ім. О.М. Бекетова,
61002, Харків, вул. Маршала Бажанова, 17,
тел/phone +380 66 9797302, e-mail: kovalova.jv@gmail.com

Y.V. Kovalova

O.M. Beketov National University of Urban Economy in
Kharkiv,
17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Computer simulation of intermittent current mode of DC electric drive with three-phase controlled rectifier.

Introduction. The mode of intermittent current for DC motor with three-phase thyristor rectifier appears in the idle intervals of some mechanisms. Active and passive filters reduce the variable component of the rectified voltage. The capacitance of the capacitors filter is determined by the effective value of the variable component of the rectified voltage. **Problem.** Necessity of developing an analytical method for calculating the effective value of the variable component of the rectified voltage in the intermittent current mode, taking into account three parameters: the control angle, the electromagnetic time constant of the armature circuit and the load current. **Purpose.** To determine the dependence of the effective value of the variable component of the rectified voltage for three parameters in the intermittent current mode. **Methodology.** The effective value of the variable component of the rectified voltage is suggested to be determined through the voltage pulsations factor as the ratio of the effective value of the variable component of the rectified voltage to its constant component. The dependence of the pulsations factor from the parameters of the mode is determined using computer simulation of the mode for intermittent current. **Results.** The computer model is developed in the software package Simulink, which allows to change each parameter of the mode separately while stabilizing the other two. Numerical dependences of the pulsation factor on each parameter are obtained. The analytical dependence of the voltage pulsations factor on three influencing values was obtained by the method of experiment planning. **Originality.** For the first time, method has been developed for calculating pulsation factor of the rectified voltage and calculating the effective value of the variable component in the mode of intermittent currents, taking into account three parameters. **Practical value.** The proposed method will allow to rationally determine the capacity of the capacitors of active and passive filters and increase the efficiency of electromechanical power conversion by reducing the variable component of the rectified voltage. References 6, tables 7, figures 5.

Key words: thyristor rectifier, voltage pulsations, angle of control, intermittent current.