

estimates of the distortions caused by these harmonics have been carried out. The formulas for estimating boundary variations of the amplitude are given: $U_{max} = 1 + Kn$; phases: $j_m = \arcsos(nKn)$; the calculation of the initial phase of the harmonic j_n , in which the phase deviation φ is equal to zero: $j_2 = \pm p / 2$ and $j_3 = 0$, $j_3 = \pm p$, and the equation for j_n and φ , at which deviations U are zero.

The obtained harmonics in the simulation of distortion of sinusoidal voltage can be used to determine the permissible levels of nonlinear distortions, to calculate the errors of measurements of amplitude, frequency and phase difference from higher harmonics, to develop methods for minimizing distortions, etc.

Keywords: electric power, quality, harmonics, voltage distortion, modeling

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СНАББЕРНОМУ ВУЗЛІ ЕЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

І. М. ГОЛОДНИЙ, кандидат технічних наук

О. В. САНЧЕНКО, аспірант*

E-mail: golodnyi@ukr.net

Анотація. Сучасний асинхронний регульований електропривод базується на використанні напівпровідникових перетворювачів напруги різних типів, дослідженню різних робочих характеристик яких, через складність чи високу вартість, мало приділено уваги. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилася можливість поглибити дослідження даних процесів.

Мета дослідження – покращення якості гармонічного складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів регульованого трифазного асинхронного електропривода.

Дослідження трифазного напівпровідникового перетворювача напруги з широтно-імпульсним керуванням проводився з використанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab.

На створеній комп'ютерній моделі приведена методика вибору і вибрані параметри RC-снаббера для захисту електронного ключа і покращення гармонічного складу вихідної напруги та струму перетворювача.

Результати досліджень на комп'ютерній моделі електромагнітних процесів у колі силового електронного ключа показали, що при активно-індуктивному навантаженні ($R = 48 \text{ Ом}$, $L =$

*Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент І. М. Голодний

© І. М. Голодний, О. В. Санченко, 2018

0,0197 Гн), які відповідають обмотковим даним електродвигуна АИРП80-А6У2, імпульси напруг досягають 60 кВ.

Вибрані параметри снаббера ($R_S = 150$ Ом, $C_S = 0,3$ мкФ) дають можливість при комутації транзисторного ключа зменшити імпульс напруги до 1,1 кВ. При цьому склад вищих гармонік не порушується, але їх вплив у відсотковому співвідношенні до основної зменшується.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вищі гармоніки, форма кривої напруги та струму, комп'ютерна модель, регульований електропривод

Актуальність. Для регульованого асинхронного електропривода часто використовують напівпровідникові перетворювачі напруги, зокрема тиристорні регулятори, дослідженню робочих характеристик яких в технічній літературі приділяється мало уваги. Це пов'язано зі складністю чи високою вартістю проведення таких досліджень. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилася можливість поглибити дослідження різних характеристик електропривода та порівняти отримані результати з фактичними даними реального електропривода вентиляційної установки зі станцією керування "Кліматика-1".

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У попередніх працях показано, що для регульованого малопотужного асинхронного електропривода за собівартістю перевагу мають напівпровідникові перетворювачі напруги. Недолік таких пристроїв у тому, що вони генерують у мережу живлення імпульси напруги та вищі гармоніки. Якість електроенергії залежить від способу керування перетворювачами. Для підтвердження цього положення в MatLab було створено моделі однофазного та трифазного регульованого асинхронного електропривода з регулюванням вихідної напруги за принципом широтно-імпульсного перетворювача [1].

Мета дослідження – покращення якості гармонічного складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів регульованого трифазного асинхронного електропривода.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження трифазного напівпровідникового перетворювача напруги з широтно-імпульсним керуванням проводилося з використанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab.

Результати досліджень та їх обговорення. Для дослідження роботи снабберного кола силового транзисторного ключа і вибору його параметрів в основу взято модель трифазного напівпровідникового перетворювача з широтно-імпульсним керуванням [1], яку наведено на рис. 1. У складі силового блоку перетворювача є трифазне джерело живлення Three-Phase Source, у кожній фазі якого увімкнено активно-індуктивне навантаження RL, трифазний діодний міст Universal Bridge. Блоками RL ($R = 48$ Ом, $L = 0,0197$ Гн) імітується активний опір та індуктивність обмотки статора електродвигуна АИРП80-А6У2 приводу осьового вентилятора ВО-Ф-5,6А. У коло постійної напруги діодного моста

увімкнено силовий транзистор IGBT, який виконує роль ключа для вмикання і вимикання силового кола. Керування роботою транзистора здійснюється блоком Pulse Generator, в якому задається частота комутації та час увімкненого стану транзистора.

Решта блоків моделі є допоміжними і використовуються для визначення миттєвих значень напруги та струму (блок Scope), а також їх амплітудні величини для основної гармоніки (блок Display 1) та спектральний склад (блок To Workspace).

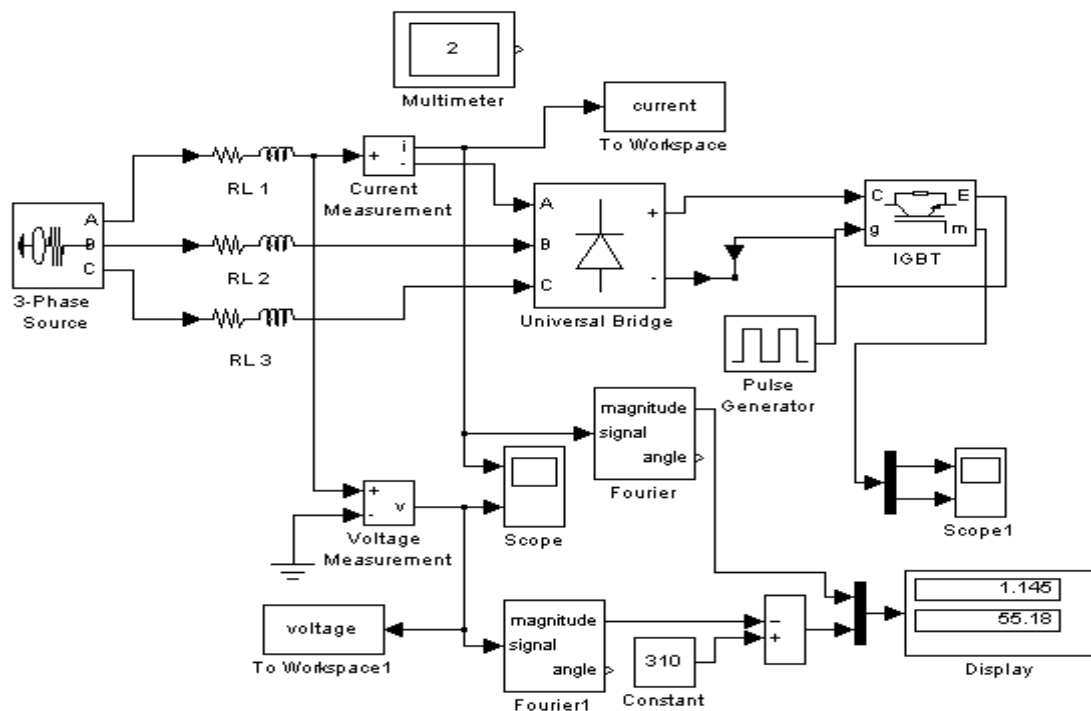


Рис. 1. Модель трифазного регулятора напруги на базі широтно-імпульсного керування

Вікно настройки силового транзисторного ключа IGBT дає можливість задати параметри елементів снабберного кола, яке складається з резистора R_S і ємності C_S .

Попередніми дослідженнями електромагнітних процесів у силовому електронному ключі без снабберного кола встановлено, що імпульсу напруги в силовому колі перетворювача досягають $U_{IMT} = 60$ кВ.

Для зменшення величини імпульсної напруги використовують один із найпростіших RC-снабберів. Розрахунок активного опору і ємності снабберного вузла розраховують наближено.

Ємність конденсатора визначають за формулою, де за час зарядки конденсатора t_3 наближено беруть час закривання транзистора збільшений у 2...3 рази [2]:

$$C_S = \frac{I_K \cdot t_3}{U_D},$$

де I_K – струм транзистора; U_D – напруга джерела живлення;
 t_3 – час зарядки конденсатора.

Максимальна перенапряга на колекторі при вимиканні транзистора з урахуванням ємності снаббера визначають за рівнянням [3]:

$$\Delta U_S = \sqrt{\frac{\Sigma L + I_K^2}{C_S}}$$

Оскільки розрахунок за приведеними виразами наближений, то зазвичай номінал снабберного конденсатора для керування двигунами потужності від сотень ват до десятків кіловат, незалежно від типу двигуна, напруги, режимів роботи, вибирають наближено в межах 0,1...0,4 мкФ. Комп'ютерна модель регулятора напруги (рис. 1) дає можливість провести корекцію величини снабберного конденсатора.

Опір снабберного резистора R_S вибирають з двох міркувань [2].

1. Опір повинен бути достатньо малим, щоб конденсатор встиг розрядитися навіть за мінімальної тривалості увімкненого стану транзистора t_P :

$$\frac{t_P}{3} > R_S C_S.$$

2. Опір повинен бути достатньо великим, щоб імпульсний струм через транзистор не перевищував допустимого значення. Якщо струм буде більший від допустимого, необхідно збільшувати величину опору.

З урахуванням вищенаведених аналітичних викладок і наступним уточненням за результатами комп'ютерного моделювання, було вибрано дані снаббера: $R_S = 150$ Ом, $C_S = 0,3$ мкФ.

Результати комп'ютерного моделювання з використанням розрахованого RC-снаббера наведено на рис. 2 і 3.

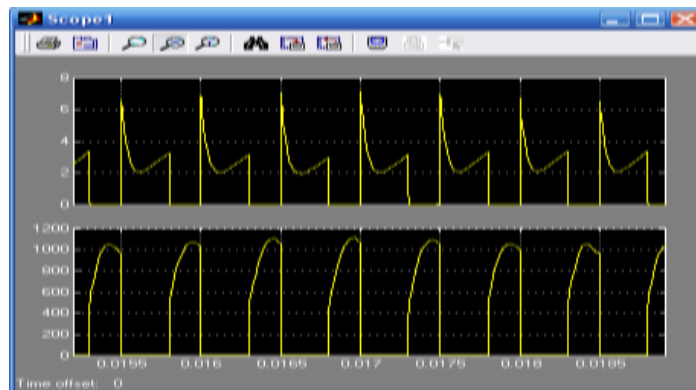


Рис. 2. Миттєві значення струму (верхня крива) і напруги (нижня крива) з використанням снаббера

Згідно з результатами досліджень встановлено, що використання снаббера дало змогу зменшити імпульс напруги при вимиканні електронного транзисторного ключа від 60 кВ до 1,1 кВ (рис. 2).

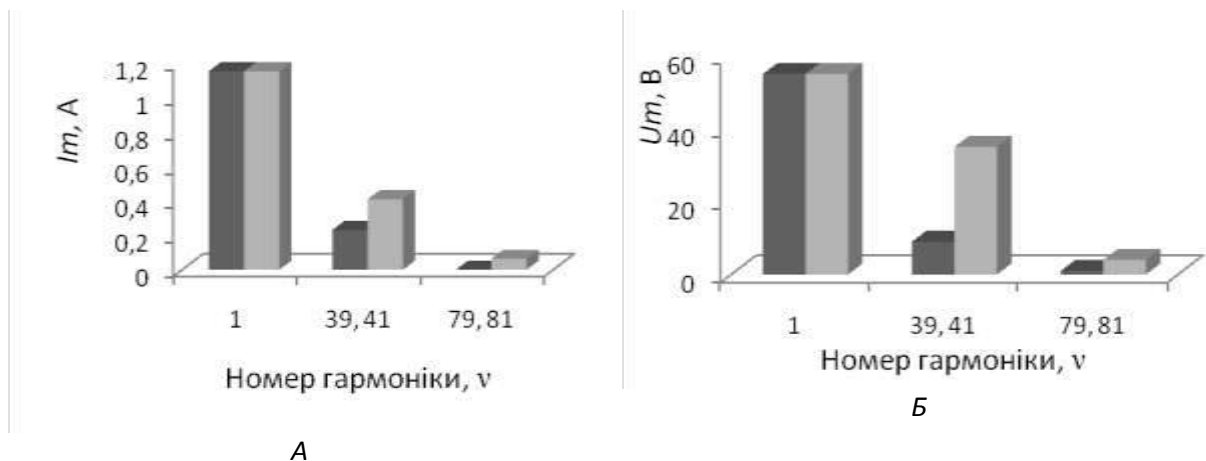


Рис. 3. Абсолютні значення амплітуд гармонік струму (а) і напруги (б) трифазного регулятора напруги зі снаббером (ліві колонки) і без нього (праві колонки)

Гармонічний склад струму і напруги регулятора з використанням снабберного вузла не змінюється. Вплив вищих гармонік, як струму, так і напруги, у відсотковому відношенні до основної зменшується (рис. 3).

Висновки і перспективи. Результати досліджень на комп'ютерній моделі електромагнітних процесів у колі силового електронного ключа свідчать, що при активно-індуктивному навантаженні ($R=48$ Ом, $L=0,0197$ Гн), яке відповідає обмотковим даним електродвигуна АИРП80-А6У2, імпульси напруг досягають 60 кВ.

На практиці розрахунок параметрів елементів снаббера проводиться наближено, результати яких можна коректувати за допомогою комп'ютерного моделювання.

Вибрані параметри снаббера ($R_S=150$ Ом, $C_S=0,3$ мкФ) дають можливість при комутації транзисторного ключа зменшити імпульс напруги до 1,1 кВ. При цьому склад вищих гармонік не порушується, але їх вплив у відсотковому співвідношенні до основної зменшується.

Список літератури

1. Голодний І. М. Комп'ютерна модель трифазного регульованого асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем / І. М. Голодний, О. В. Санченко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія "Техніка та енергетика АПК". – К., 2016. – Вип. 242 – С. 97–100.
2. Новиков П. Защита силового транзистора. Часть 1. Перенапряжение // Силовая электроника. – № 3. – 2012. – С. 31–35.
3. Колпаков А., Ламп Й. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжение и снабберы / А. Колпаков, Й. Ламп // Силовая электроника. – № 5. – 2008. – С. 98–103.

References

1. Holodnyi, I. M., Sanchenko, O. V. (2016). Kompiuterna model tryfaznoho rehulvanoho asynkhronnoho elektropyvoda z shyrotnotno-impulsnym peretvoriuvachem [Computer model of a three-phase controlled asynchronous

electric drive with a wide-pulse converter]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia "Tekhnika ta enerhetyka APK", 242, 97–100.

2. Novikov, P. (2012). Zashchita silovogo tranzistora. Ch. 1. Perenapryazheniye [Protection of the power transistor. Part 1. Overvoltage]. Silovaya elektronika, 3, 31–35.

3. Kolpakov, A., Lamp, J. (2008). Problemy proyektirovaniya IGBT-invertorov: perenapryazheniye i snabbery [Problems of designing IGBT-inverters: overvoltage and snubbers]. Silovaya elektronika, 5, 98–103.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ СНАББЕРНОГО УЗЛА ЭЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ

**И. М. Голодный,
А. В. Санченко**

Аннотация. Современный асинхронный регулируемый электропривод базируется на использовании полупроводниковых преобразователей напряжения различных типов, исследованию различных рабочих характеристик которых, из-за сложности или высокой стоимости, мало уделено внимания. С развитием компьютерного моделирования появилась возможность углубить исследования данных процессов.

Цель исследования – улучшение качества гармонического состава выходного напряжения полупроводниковых преобразователей регулируемого трехфазного асинхронного электропривода.

Исследование трехфазного полупроводникового преобразователя напряжения с широтно-импульсным управлением проводилось с использованием положений теории электрических цепей синусоидального и несинусоидального периодического тока и компьютерного моделирования в системе MatLab.

На созданной компьютерной модели приведена методика выбора и выбранные параметры RC-снаббера для защиты электронного ключа и улучшения гармонического состава выходного напряжения и тока преобразователя.

Результаты исследований на компьютерной модели электромагнитных процессов в кругу силового электронного ключа показали, что при активно-индуктивной нагрузке ($R = 48 \text{ Ом}$, $L = 0,0197 \text{ Гн}$), которые соответствуют обмоточным данным электродвигателя АИРП80-А6У2, импульсы напряжения достигают 60 кВ.

Выбранные параметры снаббера ($R_S = 150 \text{ Ом}$, $C_S = 0,3 \text{ мкФ}$) дают возможность при коммутации транзисторного ключа уменьшить импульс напряжения до 1,1 кВ. При этом состав высших гармоник не нарушается, но влияние их в процентном соотношении к основной уменьшается.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, высшие гармоники, форма кривой напряжения и тока, компьютерная модель, регулируемый электропривод

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES OF THE ELECTRON KEY SNUBERN UNIT VOLTAGE REGULATOR

I. Golodnyi,
A. Sanchenko

Abstract. *The modern asynchronous controlled electric drive is based on the use of semiconductor voltage converters of various types, for which, due to complexity or high cost, little attention is paid to the study of various performance characteristics. With the development of computer modeling, it became possible to deepen the research of these processes.*

The purpose of the study is to improve the quality of the harmonic composition of the output voltage of semiconductor converters of a regulated three-phase asynchronous electric drive.

The study of a three-phase semiconductor voltage converter with pulse-width control was carried out using the provisions of the theory of electrical circuits of sinusoidal and nonsinusoidal periodic current and computer simulation in the MatLab system.

The created computer model provides a selection procedure and selected RC snubber parameters for protecting the electronic key and improving the harmonic composition of the output voltage and current of the converter.

The results of the research on the computer model of electromagnetic processes in the circle of the power electronic key showed that when the active-inductive load ($R = 48 \text{ Ohm}$, $L = 0.0197 \text{ H}$) corresponds to the winding data of the AIRP80-A6U2 motor, the voltage pulses reach 60 kV.

The selected snubber parameters ($R_S = 150 \text{ } \Omega$, $C_S = 0.3 \text{ } \mu\text{F}$) enable the switching of the transistor switch to reduce the voltage pulse to 1.1 kV. At the same time, the composition of the higher harmonics is not violated, but their influence as a percentage of the main harmonic is reduced.

Keywords: *electromagnetic processes, higher harmonics, voltage and current curve shape, computer model, adjustable electric drive*