

УДК 681.5.015:621.314.27

Гудь В. М., к.ф-м.н. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИ РІЗНИХ ЗАКОНАХ ЗМІНИ НАПРУГИ

Приведено математичну модель перетворювача частоти з врахуванням закону зміни вихідної напруги. Досліджено залежність динаміки зміни вихідної частоти та напруги перетворювача від закону її зміни. Показано ефективність функціонування розробленої моделі.

Ключові слова: перетворювач частоти, електропривод змінного струму, математична модель, закон зміни напруги.

Вступ. Перетворювачі частоти є найбільш ефективними пристроями керування швидкістю обертання електроприводів змінного струму. Вони широко використовуються в системах водопостачання, тепlopостачання та вентиляції, приводах конвеєрів, шнекових дозаторів, віброживильників, магнітних сепараторів тощо. Їхнє використання разом з асинхронними електродвигунами дозволяє зменшити витрати електроенергії та підвищити надійність системи електроприводу [1]. При цьому, в процесі проектування автоматизованого електроприводу виникає необхідність в розробці та удосконаленні алгоритмів його управління. Одним із найменш затратних методів дослідження, а інколи і єдиним, що дозволяє за широким спектром показників перевірити процес функціонування технічної системи є комп'ютерне моделювання. Для дослідження роботи систем регулювання, що включають електропривод змінного струму необхідно мати моделі перетворювача частоти та електричного двигуна, які задовільно відображають закономірності їхнього функціонування.

Аналіз попередніх досліджень. При дослідженні систем автоматизації перетворювач частоти представляють, як правило, пропорційною або аперіодичною ланкою [2]. Це обумовлено, в першу чергу, простотою аналізу при розробці систем керування. При цьому аналіз технічних характеристик сучасних перетворювачів частоти (табл. 1) показує, що для адекватного відображення їхнього функціонування необхідно враховувати можливість плавного пуску та гальмування. Доведено [3], що для повного використання потужності асинхронного двигуна на усьому діапазоні регулювання при частотному керуванні необхідно одночасно з частотою напруги живлення змінювати і її величину. Однак, незважаючи на наявні дослідження [4-6] модель, яка з достатньою точністю імітує перетворювач частоти скалярного управління за типовими характеристиками залишається невідомою. Тому розробка простої математичної моделі перетворювача частоти, яка відображає його функціонування є актуальною задачею автоматизованого електропривода.

Таблиця 1

Типові параметри перетворювачів частоти провідних виробників

Параметр	Lenze	Danfoss	Hundai
Швидкість розгону	0-1300	1-3600	0-300
Швидкість гальмування	0-1300	0-600	0-300
Коефіцієнт підсилення регулятора	0-300	0-10	0-100
Час інтегрування регулятора	10-9999	0-2000	0-999
Час диференціювання регулятора	0-5	0-10	0-90
Мінімальна вихідна частота	0-650	5-40	0,01
Максимальна вихідна частота	7,5-650	1-1000	400

Відповідно, мета роботи розробити математичну модель перетворювача частоти з врахуванням закону та динаміки зміни вихідної напруги і частоти.

Математична модель перетворювача частоти. Показано [3], що закон зміни вихідної напруги перетворювача частоти залежить від характеру моменту навантаження M_f електроприводу. Так, зокрема при постійному моменті $M_f = \text{const}$ напруга статора повинна змінюватися пропорційно частоті:

$$U = k \cdot f.$$

У випадку вентиляторного навантаження, коли $M_H = \beta \cdot \omega^2$, величина напруги має змінюватись відповідно до співвідношення:

$$U = k \cdot f^2.$$

Для механізмів із сталою потужністю на валу $P_H = \text{const}$ (коли момент навантаження обернено пропорційний швидкості $M_H = \beta / \omega$) закон зміни напруги має описуватись співвідношенням:

$$U = k \cdot \sqrt{f},$$

де k – константа, що визначається номінальними параметрами двигуна.

Структура більшості сучасних перетворювачів частоти складається із некерованого випрямляча, фільтра, та керованого інвертора з системою управління (рис. 1). При цьому, некерований випрямляч перетворює змінний струм у постійний, фільтр згладжує пульсації випрямленої напруги, а керований інвертор перетворює постійний струм у трифазний змінний струм необхідної частоти та амплітуди. Регулювання вихідної частоти та амплітуди здійснюється з використанням високочастотного імпульсного управління з частотою у кілька кілогерц, яке характеризується періодом модуляції, протягом якого обмотка статора електродвигуна підключається по черговому до позитивного і негативного полюсів випрямляча. Тривалість таких станів протягом періоду модулюється за гармонічним законом (рис. 2). Однак за рахунок високої тактової частоти широтно-імпульсної модуляції та значної індуктивності обмоток статора, через них протікає гармонічний струм.

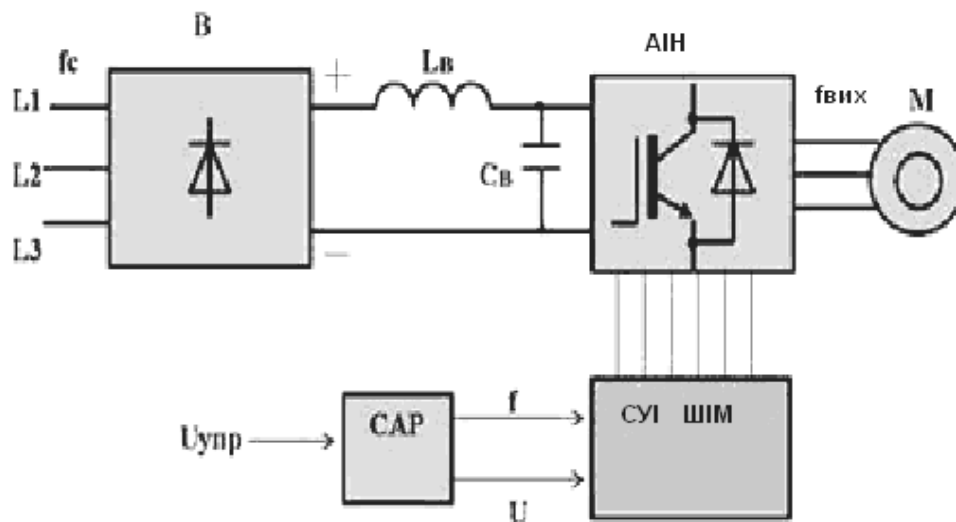


Рис. 1. Структурна схема перетворювача частоти

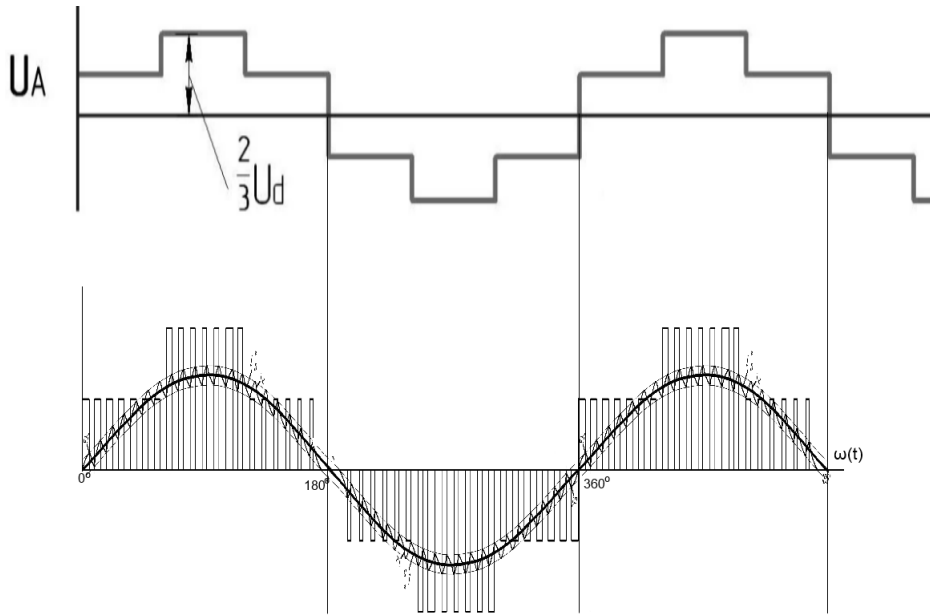


Рис. 2. Форма вихідної напруги та струму двигуна (фаза А) при живленні від перетворювача частоти

Відповідно до функціональних можливостей сучасних перетворювачів частоти математичну модель, що описує їхню роботу на макрорівні представимо у виді структурної схеми, яка складається з регулятора частоти і систем формування динаміки зміни частоти та напруги рис. 3.



Рис. 3. Структурна схема роботи перетворювача частоти

Робота регулятора частоти відображається рівнянням:

$$f_3 = k_p \cdot \Delta x + k_d \frac{d\Delta x}{dt} + k_I \int \Delta x dt, \quad (1)$$

де $\Delta x = x_3 - x_D$ – сигнал розузгодження між заданим та дійсним значенням регульованої величини, k_p , k_d і k_I – параметри ПД – регулятора.

Динаміку дійсного значення частоти на виході перетворювача можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{df_D}{dt} = \text{sign}(f_3 - f_D) \cdot v_{f_P}, \text{ при } f_D < f_3, \\ \frac{df_D}{dt} = \text{sign}(f_3 - f_D) \cdot v_{f_G}, \text{ при } f_D > f_3, \\ \frac{df_D}{dt} = 0, \text{ при } f_D = f_3, \end{cases} \quad (2)$$

де sign – знакова функція; f_3 – задане (необхідне) значення частоти напруги живлення, f_D – дійсне значення частоти напруги живлення на виході частотного перетворювача, v_{f_P} – швидкість зміни частоти напруги живлення при розгоні електропривода, v_{f_G} – швидкість зміни частоти напруги живлення при гальмуванні електропривода.

Формувач напруги відповідно до заданого закону змінює її значення на виході перетворювача частоти:

$$\begin{cases} U = \frac{U_H}{f_H} f_p, \text{ при } \frac{U_H}{f_H} = const, \\ U = \frac{U_H}{\sqrt{f_H}} \sqrt{f_p}, \text{ при } \frac{U_H}{\sqrt{f_H}} = const, \\ U = \frac{U_H}{f_H^2} f_p^2, \text{ при } \frac{U_H}{f_H^2} = const, \end{cases} \quad (3)$$

де U – діюче значення вихідної напруги, U_H та f_H – номінальні значення напруги та її частоти для асинхронного двигуна, f_p – дійсне реальне значення частоти напруги живлення на виході частотного перетворювача.

Моделювання роботи перетворювача частоти. Аналіз роботи перетворювача здійснювали методом імітаційного моделювання з використанням додатку Simulink середовища Matlab на імітаційній моделі перетворювача частоти структура якої представлена на рис. 4.

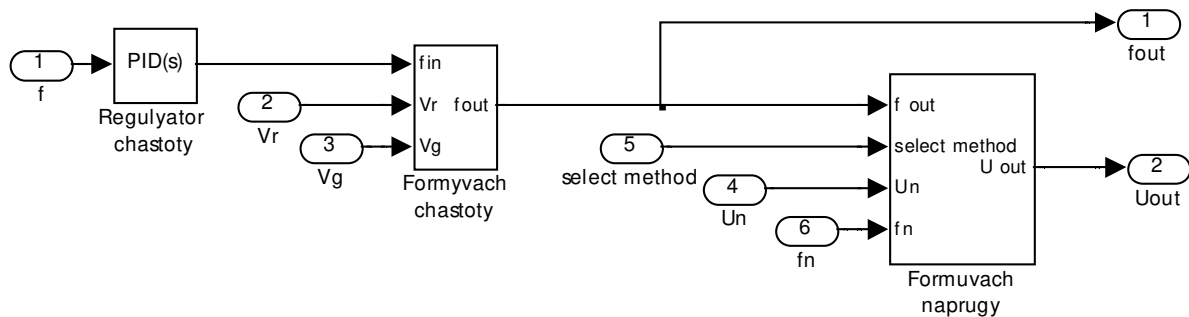


Рис. 4. Імітаційна модель перетворювача частоти

Вона містить регулятор частоти та блоки-підсистеми формування динаміки зміни частоти та напруги.

В блоці **Regulator chastoty** задано рівняння 1.

Підсистема **Formyvach chastoty** (рис. 5) описує динаміку формування вихідної частоти побудована відповідно до співвідношень 2. Величини **Vr** та **Vg** дозволяють змінювати швидкості збільшення та зменшення частоти вихідної напруги.

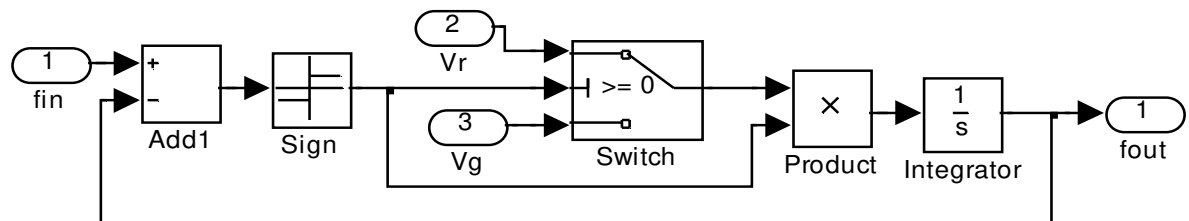


Рис. 5. Імітаційна модель блоку формування вихідної частоти перетворювача

Підсистема **Formuvach napruvy** (рис. 6) відображає можливість переключення між типовими законами зміни вихідної напруги відповідно до (3) шляхом подання керування на вхід **select method**. На вхід **f out** подається величина сформованої частоти вихідної напруги. На входах **Un** та **fn** задаються номінальні параметри асинхронного двигуна електроприводу.

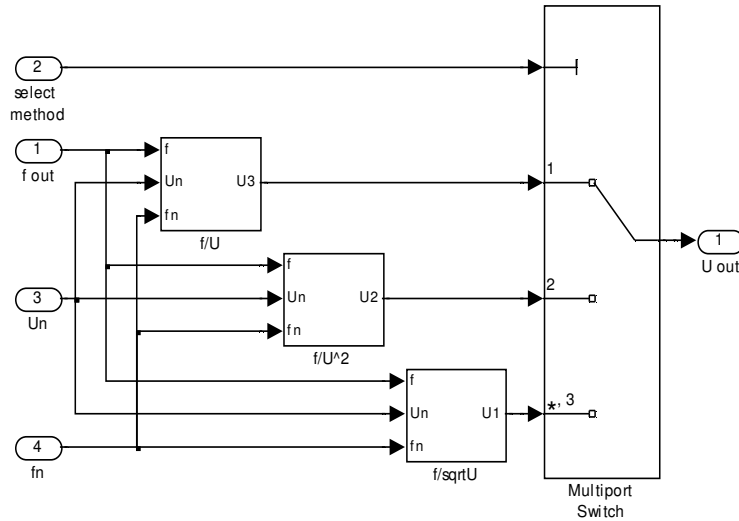


Рис. 6. Імітаційна модель блоку формування вихідної напруги

Для порівняльного аналізу динаміки зміни вихідної частоти та напруги досліджували імітаційну модель представлену на рис. 7.

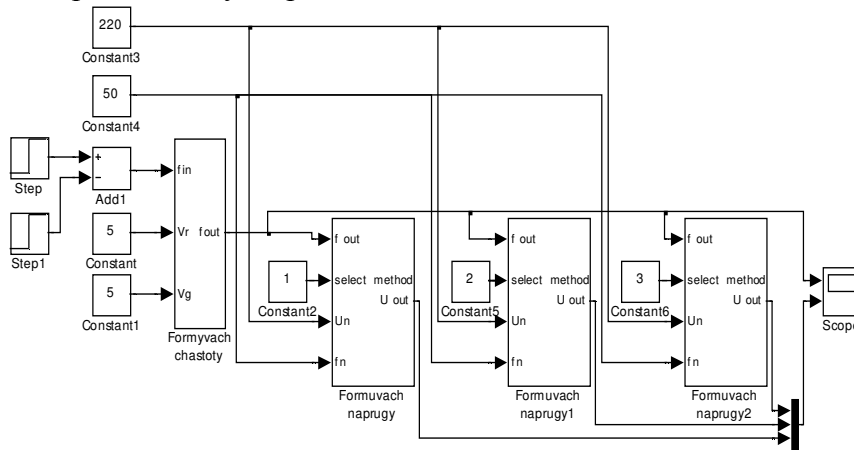


Рис. 7. Імітаційна модель частотного перетворювача при трьох режимах формування вихідної напруги відповідно

Моделювання динаміки зміни вихідної частоти та напруги підтвердило ефективність використання розробленої моделі (рис. 8).

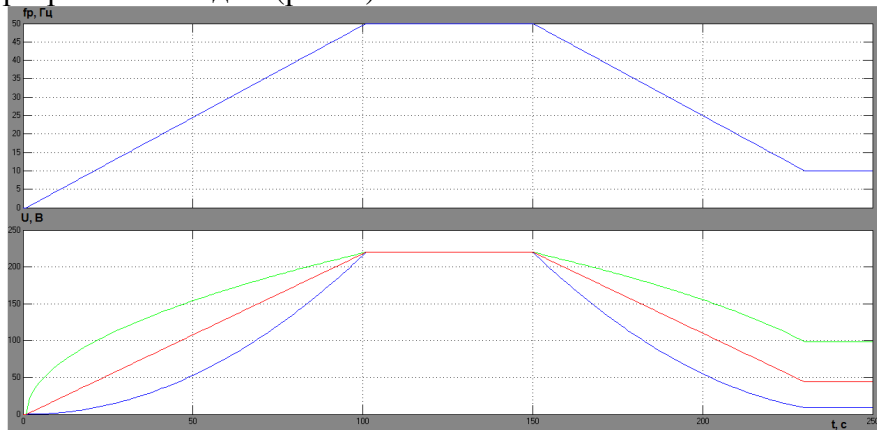


Рис. 8. Динаміка зміни вихідної частоти та напруги перетворювача частоти при заданому значення 50 Гц в початковий момент часу, 10 Гц в момент часу 150 с, для швидкості зміни частоти 0,5 Гц/с при різних законах зміни напруги

Висновки. Таким чином, запропонована модель може ефективно використовуватися для дослідження перехідних процесів у частотно-регульованих електроприводах змінного струму зі скалярним управлінням. Показано, що розроблена модель дозволяє з достатньою точністю імітувати роботу сучасних перетворювачів частоти з врахуванням їхніх типових технічних характеристик.

1. Фролов Ю. М. Состояние и тенденции развития электропривода // Электротехнические комплексы и системы управления № 1, 2006. – С. 4–10.
2. Москаленко В. В. Системы автоматизированного управления электропривода. – М. : ИНФРА-М, 2004. – 208 с.
3. Закладний О. М., Праховник А. В., Соловей О. І. Енергозбереження засобами промислового електропривода. Навчальний посібник. – К. : Кондор, 2005. – 408 с.
4. Жемеров Г. Г., Ильина О. В., Крылов Д. С., Тугай Д. В., Титаренко И. Г., Бару А. Ю., Шинднес Ю. Л. Сопоставление преобразовательных систем высоковольтного частотно-регулируемого электропривода переменного тока // Электротехника і Електромеханіка № 6, 2013. – С. 49–58.
5. Чорний О. П., Титюк В. К. Особливості дослідження електроприводів з асинхронними двигунами при живленні їх від перетворювачів з широтно-імпульсною модуляцією вихідної напруги // Інженерні та освітні технології в електротехнічних та комп'ютерних системах. № 3, 2013. – С. 41–55.
6. Антонов М. Л. Асинхронний електропривод на основі трирівневого безпосереднього перетворювача частоти зі скалярним керуванням // Електротехнічні та комп'ютерні системи, № 15. – 2014. – С. 104–106.

Рецензент: д.т.н., професор Хлапук М. М. (НУВГП)

Hud V. M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

SIMULATION OF FREQUENCY CONVERTERS SCALAR CONTROL DIFFERENT LAWS VOLTAGE CHANGES

The mathematical model of the frequency converter with the variation of the output voltage. The dependence of the dynamics of change in the original frequency and voltage converter from the law of change. The efficiency of the functioning of the developed model.

Keywords: frequency converter, AC drive, mathematical model, the variation of voltage.

Гудь В. М., к.ф.-м.н. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ЗАКОНАХ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Приведена математическая модель преобразователя частоты с учетом закона изменения выходного напряжения. Исследована зависимость динамики изменения исходной частоты и напряжения преобразователя от закона ее изменения. Показана эффективность функционирования разработанной модели.

Ключевые слова: преобразователь частоты, электропривод переменного тока, математическая модель, закон изменения напряжения.