

УДК 621.314.2

С. О. Гулак,

(старший викладач кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ)

Е. К. Єрмоленко

(магістрант Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ)

О. І. Тицишин

(студент Державного економіко-технологічного університету транспорту, м. Київ)

МЕТОД ЗМЕНШЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК В НАПРУЗІ ЖИВЛЕННЯ ПРИВОДА ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОВОЗІВ СЕРІЇ ВЛ80^{Т,К}

У статті розглянуті та досліджені причини виникнення вищих гармонійних складових струму двигунів допоміжного привода електровозів серії ВЛ80^{Т,К}, вплив вищих гармонік струму на коефіцієнт потужності допоміжного привода. Обґрунтовані заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності системи допоміжних машин та доведено доцільність застосування гібридного компенсатора реактивної потужності для підвищення коефіцієнта потужності допоміжного електропривода електровозів серії ВЛ80^{Т,К}.

Ключові слова: модель допоміжного електропривода, LC – фільтр, адаптивна система автоматичного керування, вищі гармонійні складові струму, коефіцієнт потужності, коефіцієнт спотворення.

В статье рассмотрены и исследованы причины возникновения высших гармонических составляющих тока двигателей вспомогательного привода электровозов серии ВЛ80^{Т,К}, влияние высших гармоник тока на коэффициент мощности вспомогательного привода. Обоснованы мероприятия по повышению коэффициента мощности системы вспомогательных машин и доказана целесообразность применения гибридного компенсатора реактивной мощности для повышения коэффициента мощности вспомогательного электропривода электровозов серии ВЛ80^{Т,К}.

Ключевые слова: модель вспомогательного электропривода, LC – фильтр, адаптивная система автоматического управления, высшие гармонические составляющие тока, коэффициент мощности, коэффициент искажения.

© Гулак С. О., Єрмоленко Е. К., Тицишин О. І., 2014

Постановка проблеми. Згідно з вимогами національної комісії, що здійснює Державне регулювання в області енергетики коефіцієнт потужності споживачів повинен бути не меншим за 0,9 ($\cos\varphi \geq 0.9$). Аналіз спожитої на тягу поїздів активної та реактивної потужностей на Південно-Західній залізниці за 2012 р. свідчить, що сумарний коефіцієнт потужності електрорухомого складу $\cos\varphi = 0.773$. Доцільно розробити заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності кожної одиниці електрорухомого складу, що експлуатується на Укрзалізниці.

Розробка силових транзисторів, що здатні працювати при великих значеннях напруги і струму, та впровадження їх на рухомому складі відкриває широкі можливості для створення і реалізації нових конструкцій перетворювачів, а також підвищення енергетичних та експлуатаційних показників електровозів.

Застосування комбінованого компенсатора реактивної потужності дозволить за допомогою LC – фільтра усунути зсув фаз між напругою живлення та струмом, що споживається допоміжними машинами, та за допомогою адаптивної системи керування, яка вводиться в систему допоміжного привода, корегувати форму напруги живлення привода допоміжних машин, компенсуючи вищі гармонійні складові струму привода допоміжних машин

Моделювання є важливим етапом проектування електропривода допоміжних машин. Побудова реальної моделі з параметрами, які максимально наближені до предмета моделювання, виявляє низку непередбачуваних проблем, котрі можуть з'явитися в процесі експлуатації електропривода допоміжних машин електровоза.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено аналіз факторів, які впливають на зниження коефіцієнта потужності тягового електропривода та розглянуто шляхи підвищення коефіцієнта потужності тягового електропривода на електровозах серії ВЛ80^{Т,К} [1, 2].

Для підвищення коефіцієнта потужності електропривода допоміжних машин на електровозах серії ВЛ80^{Т,К} треба обґрунтувати і розробити структурну схему активної частини гібридного компенсатора.

Мета статті. Розглянути фактори, що впливають на зниження коефіцієнта потужності системи допоміжних машин електровозів серії ВЛ80^{Т,К}. Деталі тягового електропривода електровоза постійного струму з широтно-імпульсним регулюванням напруги тягових двигунів. Обґрунтувати заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності допоміжного електропривода електровозів серії ВЛ80^{Т,К}.

Виклад основного матеріалу дослідження. На електровозах серії ВЛ80 як допоміжні машини використовуються трьохфазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які живляться від машинного перетворювача – розчіплювача фаз. Оскільки фазорозчіплювач живиться від обмотки власних потреб, яка магнітнопов'язана з тяговою обмоткою трансформатора, то навантажувальна складова струму тягових обмоток, яка проходить по первинній обмотці, створює вищі гармонійні струми основного магнітного потоку в магнітопроводі, що в свою чергу наводить вищі гармонійні напруги в обмотці власних потреб, які в свою чергу створюють вищі гармонійні струми, що звичайно ж знижує коефіцієнт потужності. В моменти комутації випрямляч «влаштовує» коротке замикання вторинної обмотки трансформатора, що призводить до появи ділянок пониженої напруги в кривій напруги обмотки власних потреб. При роботі асинхронної машини у режимі двигуна, коли напруга обмотки власних потреб миттєво змінюється до нуля, є фактично режимом динамічного гальмування. Такий

режим роботи двигуна звичайно погіршує його технічний стан, оскільки виникають пульсації моменту на валу. Тому є доцільним для усунення зсуву фаз між напругою живлення і струмом, що споживається допоміжними машинами, використовувати компенсатори реактивної потужності (LC – компенсатори) і за допомогою адаптивних систем керування, які вводяться в систему допоміжного привода, корегувати форму напруги живлення привода допоміжних машин, компенсуючи вищі гармонійні складові струму привода допоміжних машин.

Структура живлення системи допоміжних машин має такий вигляд (рис.1),

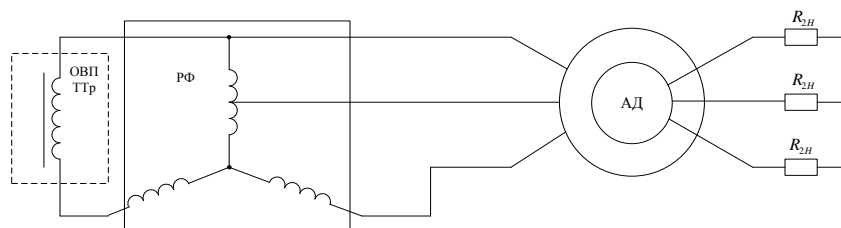


Рис. 1. Схема живлення АД в системі допоміжних машин

де ОВП ТТр – обмотка власних потреб тягового трансформатора; РФ – розчіплювач фаз; АД – асинхронний двигун (мотор – компресора, мотор – вентилятора та мотор – насоса); R_{2H} – фазний опір навантаження.

Для аналізу факторів, що впливають на значення коефіцієнта потужності, слід скористатись еквівалентною Т – подібною схемою заміщення асинхронного двигуна (рис. 2).

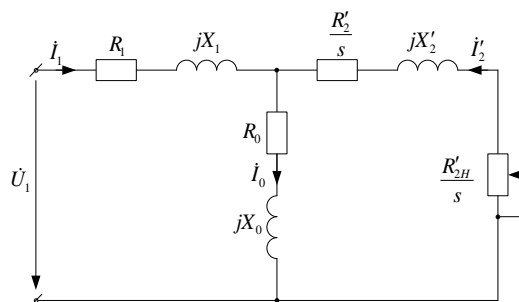


Рис. 2. Еквівалентна Т – подібна схема заміщення

На рис. 2 \dot{U}_1 – фазна напруга ротора; \dot{I}_1 – фазний струм ланцюга ротора; \dot{I}_0 – фазний струм контура намагнічування; \dot{I}'_2 – фазний струм ланцюга ротора, приведений до обмотки статора; R_1 – активний фазний опір обмотки статора; X_1 – індуктивний фазний опір обмотки статора; R_0 – активний фазний опір контура намагнічування; X_0 – індуктивний фазний опір контура намагнічування; R'_2 – активний фазний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора; X'_2 – індуктивний фазний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора; R'_{2H} – активний фазний опір навантаження, приведений до обмотки статора;

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – ковзання; ω_0 – кутова швидкість поля двигуна; ω – кутова швид-

кість двигуна.

Як видно з рис. 2, фазні опори ланцюгів ротора і статора та контура намагнічування мають активно-індуктивний характер. Це означає, що між фазними напругами і струмами в цих ланцюгах буде існувати фазовий зсув, який впливає на величину коефіцієнта потужності привода допоміжних машин. Крім того, такі явища в асинхронних двигунах як поверхневий ефект, викликаний полями розсіювання і насичення магнітопровода призводять до виникнення вищих гармонік фазних струмів, що також призводить до зменшення коефіцієнта потужності. Шляхи підвищення коефіцієнта потужності в системі допоміжного електропривода такі самі як і в тяговому: зсув фаз між фазними напругами і струмами буде компенсуватись за допомогою блоку конденсаторів, вищі гармоніки – за допомогою адаптивної системи керування формою кривою напруги на вторинній обмотці власних потреб тягового трансформатора.

Для побудови структурної схеми асинхронного двигуна складається система рівнянь:

$$\begin{aligned} p\dot{\psi}_1 &= \dot{U}_1 - \frac{1}{\sigma \cdot T_1} \cdot (\dot{\psi}_1 - K_2 \cdot \dot{\psi}_2) - j\omega_{0EP} \cdot \dot{\psi}_1; \\ p\dot{\psi}_2 &= -\frac{1}{\sigma \cdot T_2} \cdot (\dot{\psi}_2 - K_1 \cdot \dot{\psi}_1) - j\omega_s \cdot \dot{\psi}_2; \\ \dot{I}_1 &= \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot (\dot{\psi}_1 - K_2 \cdot \dot{\psi}_2); \\ \dot{I}_2 &= \frac{1}{\sigma \cdot L_2} \cdot (\dot{\psi}_2 - K_1 \cdot \dot{\psi}_1); \\ M_o &= \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot \frac{K_1}{\sigma \cdot L_2} \cdot \text{Im}[\dot{\psi}_1 \cdot \tilde{\psi}_2] \end{aligned} \quad (1)$$

де $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ – постійна часу обмотки статора; R_1 – активний опір обмотки статора; L_1 – індуктивність обмотки статора; $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ – постійна часу обмотки ротора; R_2 – активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора; L_2 – індуктивність обмотки ротора, приведена до обмотки статора; J – момент інерції двигуна; M_c – момент навантаження; $K_1 = \frac{L_m}{L_1}$; $K_2 = \frac{L_m}{L_2}$; L_m – індуктивність розсіювання; $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ – коефіцієнт розсіювання машини; $p_n \cdot \omega$ – кутова швидкість ротора; ω_p – кутова швидкість роторної ЕРС; p_n – число пар полюсів; ω_{0EP} – частота статорної напруги; M_o – момент двигуна; $p = \frac{d}{dt}$ – похідна.

На основі виразів (1) будується структурна схема асинхронного двигуна (рис. 3).

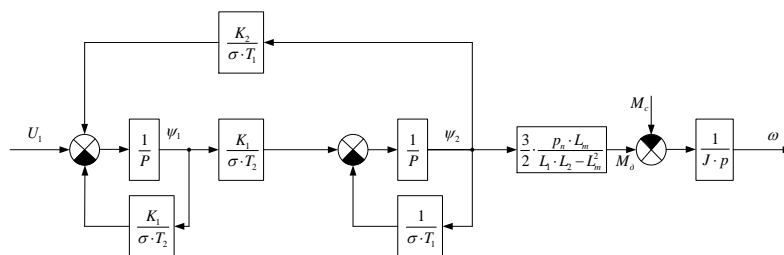


Рис. 3. Структурна схема асинхронного двигуна для аналізу привода з розімкненою системою, в якій при зміні частоти змінюється тільки модуль напруги

Виконавши перетворення, можна передатну функцію розімкненої структурної схеми асинхронного двигуна (2):

$$W_{роз}(p) = W_4(p) \cdot \frac{1}{J \cdot p} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{p_n \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2} = \frac{\sigma \cdot T_1 \cdot K_1 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{p_n \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}}{J \cdot p \cdot [(\sigma \cdot T_2 \cdot p + K_1) \cdot (\sigma \cdot T_1 \cdot p + 1) - K_1 \cdot K_2]} = \frac{K_{роз}}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p} \quad (2)$$

$$\text{де } K_{роз} = \frac{1}{J} \cdot \sigma \cdot T_1 \cdot K_1 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{p_n \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}; \quad a_3 = \sigma^2 \cdot T_1 \cdot T_2; \quad a_2 = \sigma \cdot (T_2 + K_1 \cdot T_1);$$

$$a_1 = K_1 \cdot (1 - K_2).$$

Якщо повернутись до рис. 1, то передатна функція розімкненої системи – розчіплювач фаз – асинхронний двигун – буде визначатись добутком передатних функцій цих елементів. Передатна функція асинхронного двигуна визначається виразом (2). Передатна функція розчіплювача фаз визначається з таких міркувань. Розчіплювач фаз виконує роль перетворювача однофазної системи живлення в трифазну. Причому, він працює в установленому режимі. Тобто, інерційність перетворення відсутня. Вхідною напругою служить фазна напруга однофазної системи живлення з амплітудою $U_{ex} = 380, B$. Обмотки споживача (в даному випадку це асинхронний двигун) з'єднані зіркою. Тобто, вхідна фазна напруга розчіплювача фаз є для асинхронного двигуна лінійною, а вихідна напруга розчіплювача фаз є фазною напругою асинхронного двигуна ($U_{вix} = 220, B$). Тобто, коефіцієнт передачі фазорозчіплювача буде рівним:

$$K_{p\phi}(p) = \frac{U_{вix}}{U_{ex}} = \frac{220}{380} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Тоді передатна характеристика розімкненої системи «розчіплювач фаз – асинхронний двигун»:

$$W'_{роз}(p) = W_{p\phi}(p) \cdot W_{роз}(p) = \frac{K'_{роз}}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p} \quad (4)$$

$$\text{де } K'_{роз} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{J} \cdot \sigma \cdot T_1 \cdot K_1 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{p_n \cdot L_m}{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}.$$

Адаптивна система, що проектується, має вигляд (рис. 4).

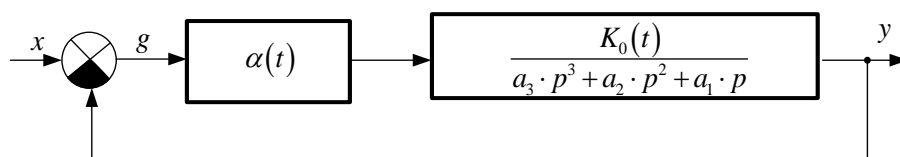


Рис. 4. Спрощена структурна схема приводу допоміжних машин, де коефіцієнт передачі об'єкта $K_0(t)$ змінюється в часі

В даній схемі (рис. 4) коефіцієнт передачі об'єкта $K_0(t)$ (асинхронного двигуна) змінюється в часі ($K_0(t) = K_0 + \Delta K_0(t)$). Для цієї схеми треба синтезувати блок адаптації (БА) і побудувати адаптивну систему з еталонною моделлю, в якій процес адаптації здійснювався б методом піднастроювання коефіцієнта передачі регулятора (розчіплювача фаз):

$$\alpha(t) = \alpha + \Delta\alpha(t) \quad (5)$$

Передаточні функції розімкненої системи в оптимальному режимі настроювання $W_1(p)$ і зміненому режимі $W_2(p)$ описуються виразами:

$$W_1(p) = \frac{K_0 \cdot \alpha}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p} \quad (6)$$

$$W_2(p) = \frac{K_0 \cdot \alpha + c(t)}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p} \quad (7)$$

де $c(t) = \alpha \cdot \Delta K_0 + \Delta\alpha \cdot K_0 + \Delta\alpha \cdot \Delta K_0$.

Діапазоном $\Delta\alpha \cdot \Delta K_0$ можна знехтувати через його мінімальність.

За еталонну модель приймають ланку відповідну передатній функції розімкненої системи в номінальному режимі настроювання за первинним критерієм оптимізації:

$$W_M(p) = \frac{K_M}{a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p} \quad (8)$$

де $K_M = K_0 \cdot \alpha$.

Диференційні рівняння моделі та розімкненої системи (7) та (8) можна записати як:

$$a_3 \cdot \ddot{y}_M + a_2 \cdot \dot{y}_M + a_1 \cdot y_M = K_M \cdot g \quad (9)$$

$$a_3 \cdot \ddot{y} + a_2 \cdot \dot{y} + a_1 \cdot y = (K_0 \cdot \alpha + c) \cdot g \quad (10)$$

За критерій адаптації приймається похибка неузгодження вихідних величин моделі та системи $\varepsilon = y_M - y$, для чого віднімемо рівняння (10) від рівняння (9):

$$a_3 \cdot \ddot{\varepsilon} + a_2 \cdot \dot{\varepsilon} + a_1 \cdot \varepsilon = c \cdot g$$

або

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1; \\ \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2; \\ \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_3; \\ \dot{\varepsilon}_3 = -a'_1 \cdot \varepsilon_2 - a'_2 \cdot \varepsilon_3 - c' \cdot g \end{cases} \quad (12)$$

де $a'_1 = \frac{a_1}{a_3}$; $a'_2 = \frac{a_2}{a_3}$; $c' = \frac{c}{a_3}$

Для забезпечення стійкості процесу адаптації алгоритм зміни коефіцієнта настроювання $\Delta\alpha(t)$ визначається за методом функції Ляпунова. Вибирається як функцію Ляпунова додатно визначену функцію:

$$V = \beta_1 \cdot \varepsilon_1^2 + \beta_2 \cdot \varepsilon_2^2 + \beta_3 \cdot \varepsilon_3^2 + \beta_4 \cdot c^2 \quad (13)$$

де $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – додатні числа.

Знаходиться її похідна:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \dot{\varepsilon}_1 + 2 \cdot \beta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \dot{\varepsilon}_2 + 2 \cdot \beta_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot \dot{\varepsilon}_3 + 2 \cdot \beta_4 \cdot c \cdot \dot{c} = \\ &= 2 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + 2 \cdot \beta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 + 2 \cdot \beta_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot (-a'_1 \cdot \varepsilon_2 - a'_2 \cdot \varepsilon_3 - c' \cdot g) + \\ &+ 2 \cdot \beta_4 \cdot c \cdot \dot{c} = 2 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + 2 \cdot \beta_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 - \\ &- 2 \cdot \beta_3 \cdot a'_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 - 2 \cdot \beta_4 \cdot a'_2 \cdot \varepsilon_3^2 - 2 \cdot \beta_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot c' \cdot g + 2 \cdot \beta_4 \cdot c \cdot \dot{c} = \\ &= 2 \cdot \varepsilon_1 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_2 + 2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \cdot (\beta_2 - \beta_3 \cdot a'_1) - 2 \cdot \beta_4 \cdot a'_2 \cdot \varepsilon_3^2 + \\ &+ 2 \cdot c \cdot (\beta_4 \cdot \dot{c} - \beta_3 \cdot g \cdot \varepsilon_3) \end{aligned} \quad (14)$$

Процес адаптації буде асимптотично стійким, якщо функція (14) буде від'ємно визначеною. Ця вимога досягається при виконанні таких умов:

$$\begin{cases} \beta_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_1 = 0; \\ \beta_2 - \beta_3 \cdot a'_1 = 0; \\ \beta_4 \cdot \dot{c} - \beta_3 \cdot g \cdot \varepsilon_3 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Поклавши $\beta_4 = 1$ розраховуються значення коефіцієнтів β_i :

$$\begin{cases} \beta_2 = \beta_3 \cdot a'_1; \\ \beta_3 = \frac{\dot{c}}{g \cdot \varepsilon_3} \end{cases} \quad (16)$$

З третього рівняння (15) легко отримати алгоритм самонастроювання коефіцієнта $\alpha(t)$.

Нехай зміна коефіцієнта передачі об'єкта $\Delta k = const$ є некерованим збуренням, тобто $\Delta \dot{c} = k \cdot \Delta \dot{\alpha}$, тоді алгоритм адаптації матиме вигляд:

$$k \cdot \Delta \dot{\alpha} = \beta_3 \cdot g \cdot \varepsilon_3 \quad (17)$$

або

$$\Delta \dot{\alpha} = \frac{\beta_3}{k} \cdot \int g(\tau) \cdot \varepsilon_3(\tau) \cdot d\tau \quad (18)$$

Структурна схема отриманої адаптивної системи наведена на рис. 5.

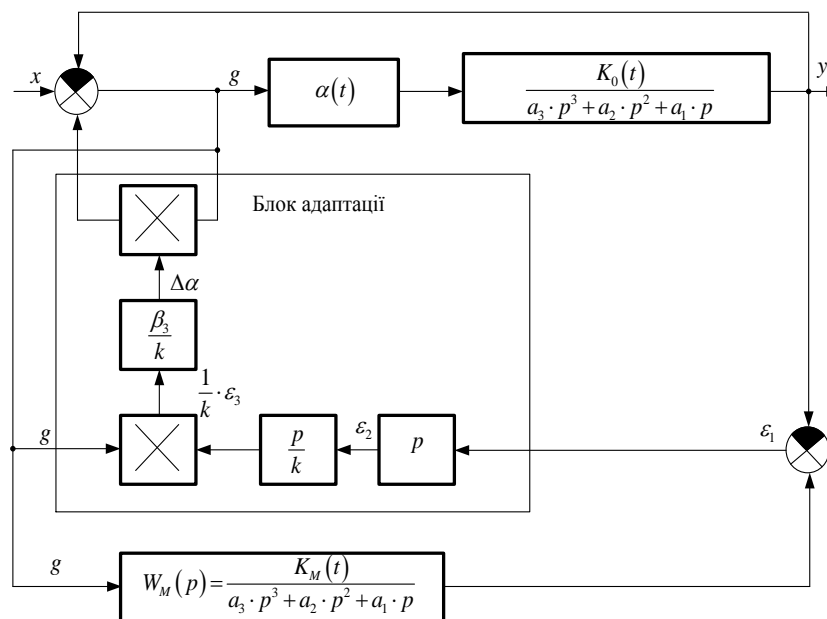


Рис. 5. Структурна схема отриманої адаптивної системи

Висновки та пропозиції

1. Розглянуто вплив вищих гармонійних складових струму на зниження коефіцієнта потужності системи допоміжних машин електровозів серії ВЛ80^{Т,К}.
2. Обґрунтовані заходи щодо підвищення коефіцієнта потужності допоміжного привода.
3. Запропоновано алгоритм роботи та структурна схема активної частини гібридного компенсатора потужності в системі допоміжного привода електровозів серії ВЛ80^{Т,К}. При застосуванні гібридного компенсатора реактивної потужності в системі допоміжного привода електровоза очікується збільшення коефіцієнта потужності допоміжного електропривода за рахунок компенсації пасивною частиною компенсатора зсуву фаз між напругою живлення та струмом, що споживається двигунами допоміжних машин та зменшення вищих гармонійних складових споживаного струму активною частиною компенсатора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гулак С. Обґрунтування застосування активних методів компенсації реактивної енергії на електровозах змінного струму серії ВЛ80^{к,т,с}. //Збірник тез науково-практичної конференції «Розвиток науки і техніки на залізничному транспорті». – К.: ДЕГУТ, 2014. – С. 39 – 40.
2. Гулак С. А., Слепухин А. Ю., Черных Ю. М., Ермоленко Э. К. Метод уменьшения высших гармоник в напряжении питания тягового привода электровозов переменного тока с коллекторными двигателями // «Вестник БелГУТ: Наука и транспорт». Научно-практический журнал №1 (28), 2014 г. – г. Гомель. – С. 11 – 12.
3. М. Г. Чиликин и др. Основы автоматизированного электропривода.: Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1974. – 568 с.
4. Тютюник А. Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування.: Навчальний посібник. – Житомир: ЖІТІ, 1998. – 512 с.

Sergey O. Goolak

(Senior Lecturer Traction Rolling Stock of Railways Chair of State University for Transport Economy and Technologies)

Edward K. Yermolenko

(Master Student of State University for Transport Economy and Technologies)

Oleg I. Tischishin

(Student of State University for Transport Economy and Technologies)

METHODS OF REDUCING HARMONIC VOLTAGE ELECTRIC LOCOMOTIVE AUXILIARY MACHINERY DRIVE SERIES VL80^{T, K}

The paper analyzed and studied the causes of higher harmonic components of current engine auxiliary electric drive series VL80^{T, K}, the influence of higher harmonic current on the power factor of the auxiliary drive. Reasonable steps to improve the power factor of the system auxiliary machinery and proved the feasibility of hybrid reactive power compensator to improve the power factor of the auxiliary electric locomotives series VL80^{T, K}.

Keywords: Model auxiliary electric – filter, adaptive automatic control system, the higher harmonic components of current, power factor, distortion factor.

REFERENCES

- 1. Goolak S. Obruntuvannya zastosuvannya aktyvnyh metodiv kompensatsiyi reaktyvnoyi energii na elektrovozah zminnogo strumu seriyi VL80^{k, s}. //Zbirnyk tez naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Rozvytok nauky i tehniki na zaliznychnomu transporti». – K.: DETUT. – P. 39 – 40.*
- 2. Goolak S. A., Slyepuchin A. U., Chernyh U. M., Yarmolenko E. K. Metod umensheniya vysshych darmonik v napryazhenii pitaniya tyagovogo privoda elektrovozov peremennogo toka s kolektornymi kolornymi dvigatyalyami. // «Vyesnik ByelGUTA: Nauka I transport», Nauchno-pratichesu zhurnal №1(28), 2014. – Gomel. – P. 11 – 12.*
- 3. M. G. Chilikin i dr. Osnovy avtomatizirovannogo elektroprivoda.: Uchebnoye posobie dlya vuzov. –M.: Energia, 1974. – 568 p.*
- 4. Tyutyunnik A.G. Optimalny i adaptivny systemy avtomatychnogo keruvannya.: Navchalnyy posibnyk. – Zhitomyr: ZhITI, 1998. – 512 p.*