

УДК 621.333.41

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.63861>

**ДИНАМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ПЕРЕДАЧІ СТАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ГАЛЬМУВАННЯМ**

**Я. В. Щербак, д-р техн. наук,  
В. П. Нерубацький, старш. викл.**

**ДИНАМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ**

**Я. В. Щербак, д-р техн. наук,  
В. П. Нерубацький, старш. преп.**

**DYNAMIC COEFFICIENT OF TRANSFER OF THE STATIC CONVERTER OF SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL BY ELECTRIC BRAKING**

**Y. Shcherbak, doct. of techn. sciences,  
V. Nerubatskyi, sen. lecturer**

*У статті виконано аналіз і синтез динамічних процесів в системі автоматичного керування електричним гальмуванням. Одержані аналітичні залежності для фактора пульсацій, які дозволяють аналізувати вплив його змін на якість електричного гальмування. Показано, що в системі з тиристорним випрямлячем вплив змін режимів електричного гальмування на динамічні процеси є меншим чим в системі з широтно-імпульсним перетворювачем.*

**Ключові слова:** Електричне гальмування, система автоматичного регулювання, фактор пульсацій, перетворювач.

*В статье выполнен анализ и синтез динамических процессов в системе автоматического управления электрическим торможением. Получены аналитические зависимости для фактора пульсаций, которые позволяют анализировать влияние его изменений на качество электрического торможения. Показано, что в системе с тиристорным выпрямителем влияние изменений режимов электрического торможения на динамические процессы меньше чем в системе с широтно-импульсным преобразователем.*

**Ключевые слова:** Электрическое торможение, система автоматического регулирования, фактор пульсаций, преобразователь.

*The output tension of the operated rectifier or converter of constant tension incorporates the pulsation component. At turning on of such converters of electric energy in structure of the closed system of automatic control the pulsation component on a chain of feedback gets on a converter control system entrance. It causes at converters of change of coefficient of transfer. These dynamic changes can be considered a factor of pulsations. Nature of changes of a factor of pulsations and its size depends on properties of system of automatic control. Receiving expression for a factor of pulsations is connected with receiving left-side value of the derivative given continuous part of system of regulation concerning the switching moments in the converter.*

*In article the analysis and synthesis of dynamic processes in system of automatic control of electric braking is made. Analytical dependences for a factor of pulsations which allow to analyze influence of its changes on quality of electric braking are received. It is shown that in system with the thyristor rectifier influence of changes of the modes of electric braking on dynamic processes is less than in system with the pulse-width converter.*

**Keywords:** Electric braking, system of automatic control, factor of pulsations, converter.

### Вступ.

У відомих роботах аналіз динамічних характеристик виконаний при представленні перетворювача у вигляді безперервної ланки. Облік дискретності перетворювача дозволяє отримати граничну швидкодію в системі з урахуванням впливу на перехідні процеси пульсаційної складової, що міститься в регульованій координаті системи. Даний підхід покладений в основу дослідження динамічних процесів в системі автоматичного керування електричним гальмуванням, викладеного в даній роботі.

### 1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.

Вихідна напруга керованого випрямляча або перетворювача постійної напруги в своєму складі має пульсаційну складову [1]. При включенні таких перетворювачів електричної енергії до складу замкнутої системи автоматичного регулювання пульсаційна складова по колу зворотного зв'язку попадає на вхід системи та дослідження його впливу на динамічні процеси.

### 3. Основна частина дослідження.

Для визначення фактора пульсацій в режимі неперервного струму в колі навантаження перетворювача розглянемо наведену на рис. 1 структурну схему. На

керування перетворювача. Це викликає в перетворювачі зміни коефіцієнта передачі. Ці динамічні зміни прийнято враховувати фактором пульсацій [2].

Характер змін фактора пульсацій та його величина залежить від властивостей системи автоматичного регулювання. Одержання виразу для фактора пульсацій пов'язано з одержанням лівостороннього значення похідної приведенної неперервної частини системи регулювання відносно моментів переключення в перетворювачі.

Для складної передавальної функції приведенної неперервної частини це є достатньо складним завданням [3, 4]. Із цього витікає, що дослідження фактора пульсацій і його впливу на систему автоматичного регулювання є актуальною задачею.

### 2. Визначення мети та задачі дослідження.

Мета даної роботи – одержання виразу для фактора пульсацій системи автоматичного регулювання струму тягового двигуна при електричному гальмуванні структурній схемі зроблені наступні позначення:  $K_n$  – статичний коефіцієнт передачі перетворювача;  $F$  – фактор пульсацій;  $T$  – період дискретності перетворювача;  $W(p)$  – передавальна функція неперервної частини.

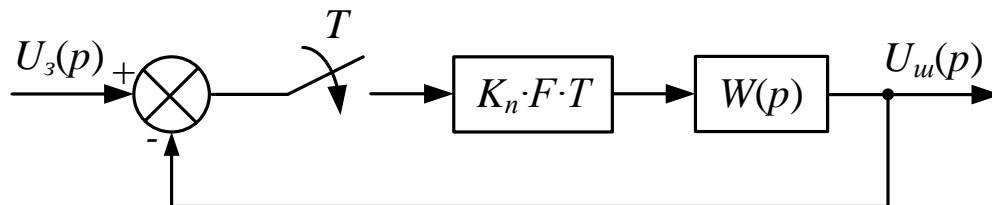


Рис. 1. Узагальнена структурна схема системи автоматичного регулювання струму

В [5] синтезовано передавальну функцію приведенної неперервної частини системи автоматичного регулювання струму

тягового двигуна в режимі електричного гальмування, яка відповідає умовам процесу кінцевої тривалості

$$W(p) = K_n \cdot K_0 \cdot \left[ \frac{K_1}{T_\zeta \cdot p + 1} + K_2 \cdot \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p \cdot (T_H \cdot p + 1) \cdot (T_\zeta \cdot p + 1)} \right], \quad (1)$$

де  $K_n$  – статичний коефіцієнт передачі перетворювача;  $K_0, K_1, K_2$  – статичні коефіцієнти передачі динамічних ланок системи автоматичного регулювання. Загальний вираз для визначення фактора пульсацій має вигляд [2]

$$F^{-1} = 1 - \frac{dU_y(t)/dt}{dU_{on}(t)/dt} \Big|_{t=nT-0}, \quad (2)$$

де  $U_y(t)$  та  $U_{on}(t)$  – вхідний і опорний сигнали системи керування. представити у вигляді суми  $n$ -аперіодичних ланок зі сталими часу  $T_i$  та коефіцієнтами передачі  $K_i$

Відомо, що передавальну функцію приведеної неперервної частини системи на основі теореми розкладу [6] можна

$$W(p) = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T_i \cdot p + 1}. \quad (3)$$

В системах електричного гальмування для регулювання струму збудження тягового двигуна застосовують тиристорний випрямляч або широтно-імпульсний перетворювач [7].

Згідно з [8] фактор пульсацій в системі регулювання з узагальненою аперіодичною ланкою (3) і тиристорним випрямлячем з аркосинусоїдальним опорним сигналом в системі імпульсно-фазового керування визначається виразом

$$F_i^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{2 \cdot T_i} + \frac{K_i \cdot (\omega_0 \cdot T_i \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1)}{1 + (\omega_0 \cdot T_i)^2} \cdot \left( \frac{T}{2 \cdot T_i} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_i} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right), \quad (4)$$

де  $\alpha_0$  – кут керування;  $m$  – пульсність випрямляча;  $\omega_0$  – кругова частота живильної мережі.

Для системи регулювання з широтно-імпульсним перетворювачем з односторонньою модуляцією [9]

$$F_i^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{T_i} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_i}} - e^{-\frac{T}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}}, \quad (5)$$

де  $\gamma$  – відносна тривалість вихідного імпульсу перетворювача.

двосторонньою модуляцією [10] на інтервалі дії вихідного імпульсу

Для системи регулювання з широтно-імпульсним перетворювачем з

$$F_{i1}^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{2 \cdot T_i} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_i}} - e^{-\frac{T}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}}, \quad (6)$$

на інтервалі паузи

$$F_{i2}^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{2 \cdot T_i} \cdot \frac{e^{-(1-\gamma) \frac{T}{T_i}} - e^{-\frac{T}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}}. \quad (7)$$

Представлення передавальної функції приведеної неперервної частини у вигляді

суми елементарних аперіодичних ланок (3) перетворює одноконтурну систему в

багатоконтурну, в якій передача інформації про пульсаційну складову вихідної напруги перетворювача передається  $n$  паралельними каналами. Кожен із паралельних каналів

формує свою складову фактора пульсацій  $F_i$ . Результируюче значення фактора пульсацій визначається виразом [11]

$$F^{-1} = 1 + \sum_{i=1}^n (F_i^{-1} - 1). \quad (8)$$

Для перетворення передавальної функції приведеної неперервної частини (1) до виду (3), виконаємо розклад її другого

$$W(p) = K_n \cdot K_0 \cdot \left\{ \frac{K_1}{T_\zeta \cdot p + 1} + \frac{K_2}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \left[ \frac{T_H \cdot (T_2 - T_H)}{T_i \cdot p + 1} + \frac{T_\zeta \cdot (T_\zeta - T_2)}{T_\zeta \cdot p + 1} \right] + \frac{K_2}{T_1 \cdot p} \right\}. \quad (9)$$

Одержаний вираз із урахуванням (4), для фактора пульсацій системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням [5] при живленні обмотки

збудження тягового двигуна від тиристорного випрямляча або широтно-імпульсного перетворювача. Так, для системи з тиристорним випрямлячем фактор пульсацій визначається виразом

$$F^{-1} = 1 + K_n \cdot K_0 \cdot \left\{ \frac{K_1 \cdot T}{2 \cdot T_\zeta} + \frac{K_2 \cdot T}{T_1} \cdot \frac{K_2}{T_1 \cdot (T_i - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \left[ T \cdot (T_\zeta - T_H) + T_H \cdot (T_2 - T_H) \cdot \frac{\omega_0 \cdot T_H \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1}{1 + \omega_0^2 \cdot T_H^2} \cdot \left( \frac{T}{2 \cdot T_H} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_H} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \right] + \right. \\ \left. + \left[ \frac{K_2 \cdot T_\zeta \cdot (T_\zeta - T_2) + K_1 \cdot T_1 \cdot (T_H - T_2)}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \right] \cdot \frac{\omega_0 \cdot T_\zeta \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1}{1 + \omega_0^2 \cdot T_\zeta^2} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{T}{2 \cdot T_\zeta} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_\zeta} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) + \frac{\text{ctg} \alpha_0}{\omega_0 \cdot T_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \right\}. \quad (10)$$

Аналіз виразу (10) показує, що на фактор пульсацій окрім кута керування  $\alpha_0$  впливають зміни коефіцієнта підсилення, який є складовою частиною  $K_2$  тягового

двигуна в генераторному режимі під час електричного гальмування. Зміни коефіцієнта підсилення викликаються змінами швидкості поїзда [12]

$$K_{\bar{A}} = \frac{c_1 \cdot V}{R_{\bar{A}}}, \quad (11)$$

де  $V$  – швидкість руху поїзда;  $R_{\bar{A}}$  в режимі холостого ходу дорівнює опору обмотки збудження, а при навантаженні

визначається добутком опорів якорного кола і кола збудження;

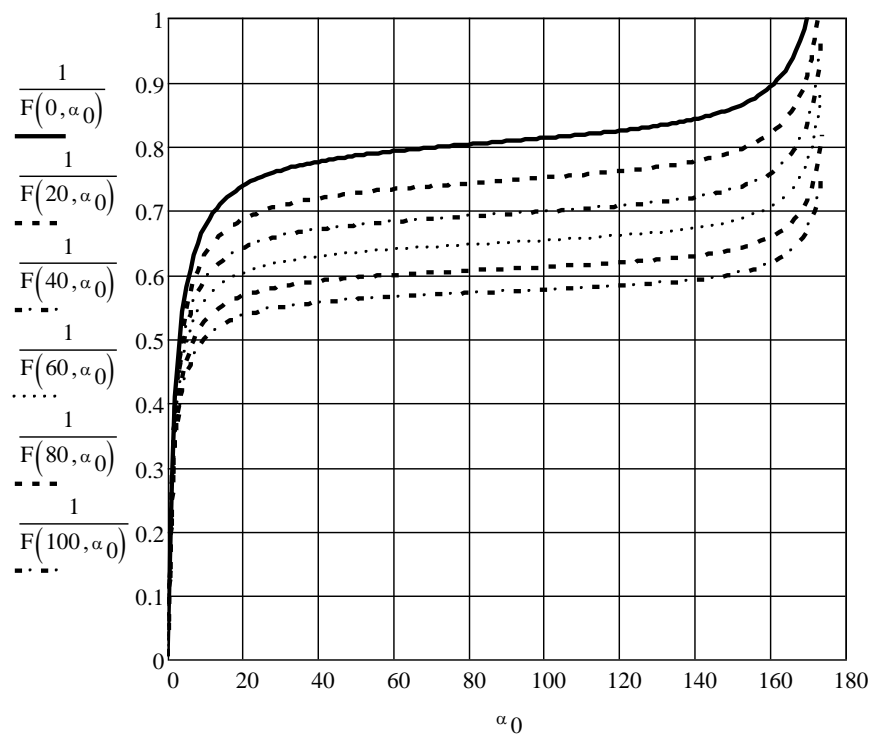
$$c_1 = \frac{1}{3,6 \cdot \pi} \cdot \frac{\mu \cdot p_n \cdot N}{D \cdot a}, \quad (12)$$

де  $\mu$  – передатне число;  $p_n$  – число пар полюсів двигуна і збудника;  $N$  – число провідників в обмотці якоря;  $D$  – діаметр колеса;  $a$  – число пар паралельних ланок обмотки якоря.

На рис. 2 наведено сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від кута керування  $\alpha_0$ , а на рис. 3 – сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від швидкості руху поїзда.

Фактор пульсацій системи автоматичного регулювання з широтно-імпульсним перетворювачем із урахуванням виразів (5), (8) та (9) визначається наступним чином:

$$F^{-1} = 1 + K_n \cdot K_0 \cdot \left[ \frac{K_1 \cdot T}{T_\zeta} \cdot \frac{e^{-\gamma \cdot \frac{T}{T_\zeta}} - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}} + \frac{K_2 \cdot T}{T_1} \cdot (1 - \gamma) + \frac{K_2 \cdot T \cdot (T_2 - T_H)}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \frac{e^{-\gamma \cdot \frac{T}{T_H}} - e^{-\frac{T}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_H}}} + \frac{K_2 \cdot T \cdot (T_\zeta - T_2)}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \cdot \frac{e^{-\gamma \cdot \frac{T}{T_\zeta}} - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}} \right]. \quad (13)$$



або.

Рис. 2. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від кута керування  $\alpha_0$  при усталених значеннях швидкості руху поїзда

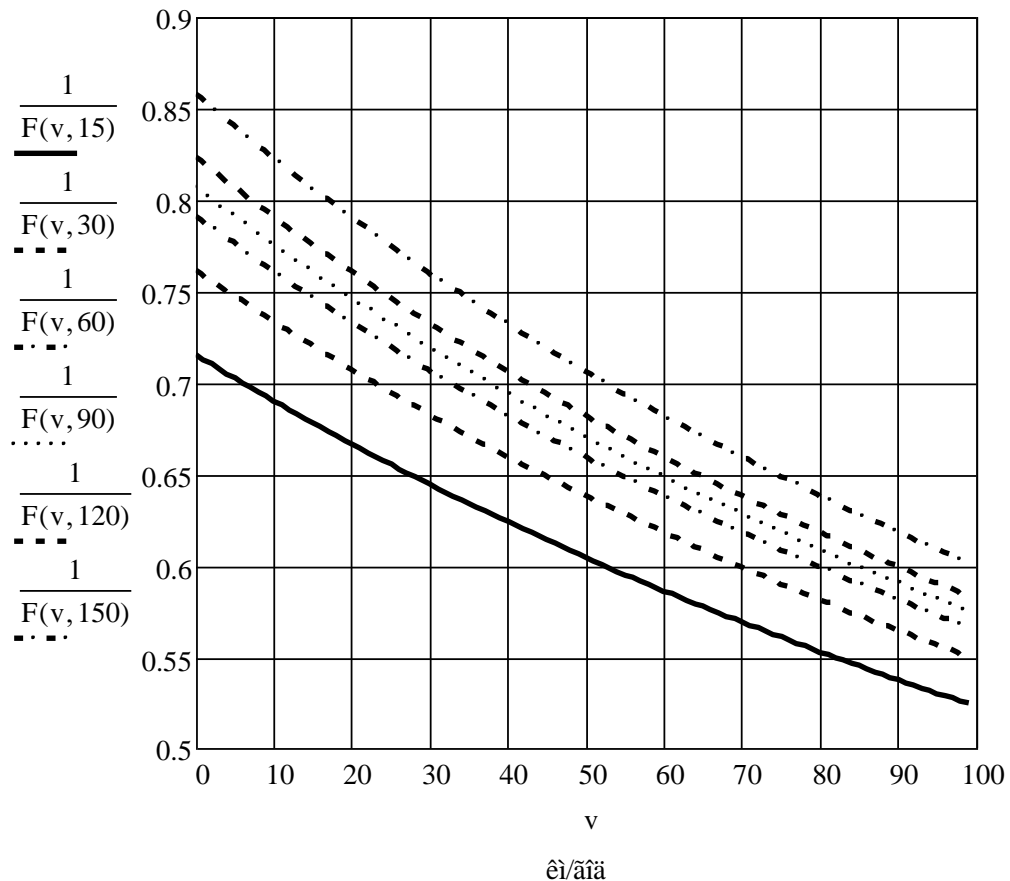


Рис. 3. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від швидкості руху поїзда при усталених значеннях кута керування

Графічні залежності, що швидкості руху поїзда наведені на рис. 4 і характеризують зміни фактора пульсацій в рис. 5. функціях керуючого параметру  $\gamma$  та

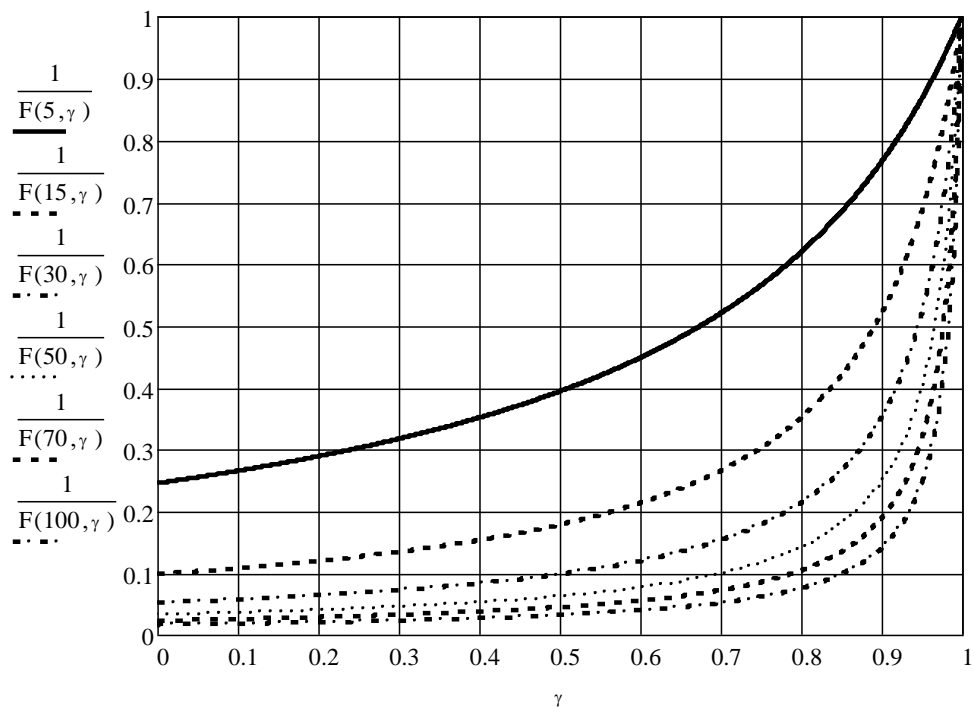


Рис. 4. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій в функціях керуючого параметру  $\gamma$  при усталених значеннях швидкості руху поїзда

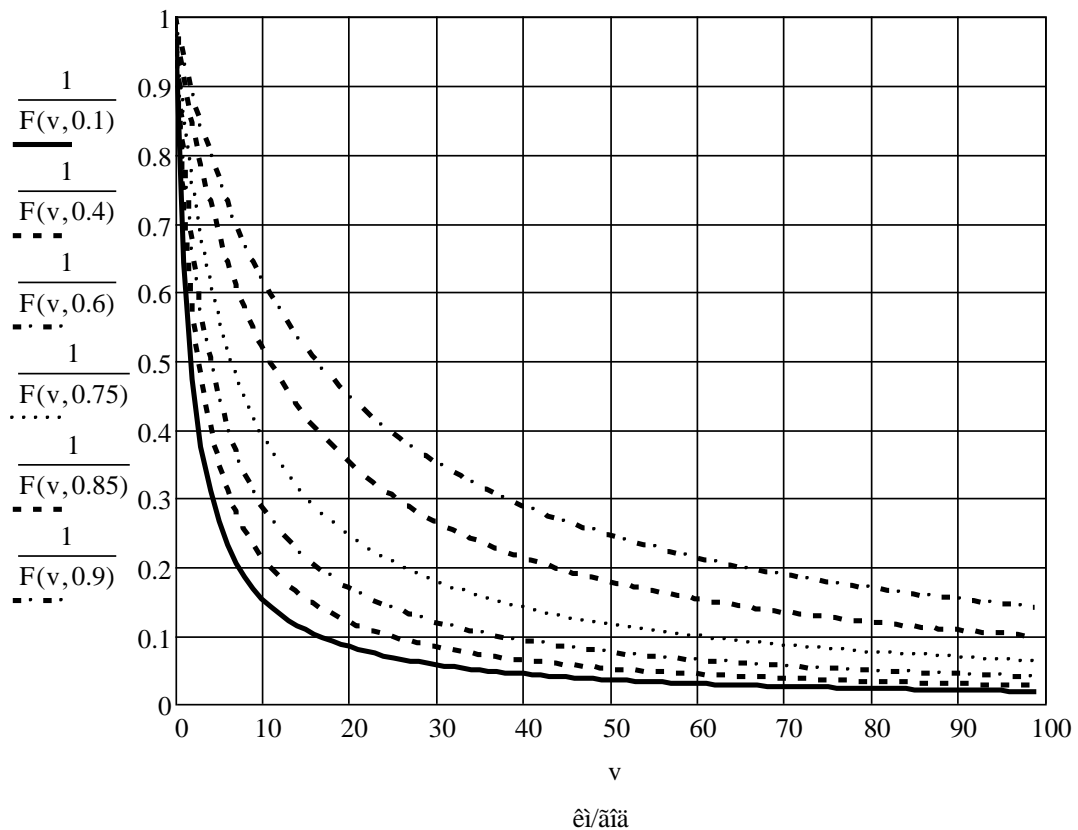


Рис. 5. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від швидкості руху поїзда при усталених значеннях керуючого параметру  $\gamma$

**4. Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Показано, що в системі з тиристорним випрямлячем вплив змін режимів електричного гальмування на динамічні процеси є меншим чим в системі з широтно-імпульсним перетворювачем.

Одержані аналітичні залежності для фактора пульсацій дозволяють аналізувати вплив його змін на якість електричного

#### Список літератури

1. Булгаков, А.А. Основы динамики управляемых вентильных систем [Текст] / А.А. Булгаков. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1963. – 220 с.
2. Bjaresten, N.A. The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier [Text] / N.A. Bjaresten // Direct Current. – 1963. – Vol. 6. – P. 154-165.
3. Шипилло, В.П. Определение установившейся реакции линейной системы на периодическое воздействие методом z- преобразования [Текст] / В.П. Шипилло // Электромеханика. – 1975. – №5. – С. 538-543.
4. Щербак, Я.В. Анализ электромагнитных процессов ШИП применением эквивалентных импульсных моделей [Текст] / Я.В. Щербак // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – №6. – С. 89-95.
5. Щербак, Я.В. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування [Текст] / Я.В. Щербак, В.П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – №1. – С. 58-63.
6. Конторович, М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях [Текст] / М.И. Конторович. – М.: Сов. Радио, 1975. – 319 с.
7. Технологічна інструкція по налагодженню схем рекуперативного гальмування електровозів постійного струму [Текст]. – Київ: ЦЕ/005. – НВЦ «Транспорт». – 2005. – 184 с.

8. Шипилло, В.П. Фактор пульсаций в системах регулирования с вентильными преобразователями [Текст] / В.П. Шипилло, Ю.С. Зинин // Электричество. – 1977. – №3. – С. 86-89.
9. Шипилло, В.П. Устойчивость замкнутой системы с широтно-импульсным преобразователем [Текст] / В.П. Шипилло, И.И. Чикотило // Электричество. – 1978. – №1. – С. 50-53.
10. Чикотило, И.М. Фактор пульсаций в замкнутой структуре с двусторонним широтно-импульсным модулятором [Текст] / И.М. Чикотило, О.Н. Диденко, Н.А. Волкова // Вестник ХПИ. – Харьков: ХГУ ИО «Вища школа». – 1987. – Вып. 12, №247. – С. 44-46.
11. Щербак, Я.В. Фактор пульсаций многоконтурных дискретных систем автоматического регулирования [Текст] / Я.В. Щербак // Технічна електродинаміка. – 1998. – №4. – С. 41-43.
12. Трахтман, Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.

---

Щербак Яків Васильович, доктор технічних наук, професор, кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Тел.: (057) 730-10-73, E-mail: [sherbak47@mail.ru](mailto:sherbak47@mail.ru)

Нерубацький Володимир Павлович, старший викладач, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Тел.: (057) 730-10-76, E-mail: [vnerubatskiy@mail.ru](mailto:vnerubatskiy@mail.ru)

Shcherbak Yakiv Vasylovych, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Contact phone: (057) 730-10-73, E-mail: [sherbak47@mail.ru](mailto:sherbak47@mail.ru)

Nerubatskiy Volodymyr Pavlovych, Senior Lecturer, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Contact phone: (057) 730-10-76, E-mail: [vnerubatskiy@mail.ru](mailto:vnerubatskiy@mail.ru)

*Стаття поступила 20.04.2015*