

УДК 621.314

## СТАБИЛИЗАЦИЯ И АКТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ЗАМКНУТОЙ СТРУКТУРЕ

Ассист. Ю. А. Семененко

## СТАБІЛІЗАЦІЯ ТА АКТИВНА ФІЛЬТРАЦІЯ ВИПРЯМЛЕНОЇ НАРУГИ В ЗАМКНЕНІЙ СТРУКТУРІ

Асист. Ю. О. Семененко

## STABILIZATION AND ACTIVE FILTERING OF THE RECTIFIED VOLTAGE IN THE CLOSED STRUCTURE

Assistant Y. O. Semenenko

*В данном исследовании решено актуальное научно-техническое задание по совершенствованию методов улучшения электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения постоянного тока со смежными электроустановками и повышения качества энергии питания электрического подвижного состава железных дорог.*

*В процессе исследований установлено, что для обеспечения эффективной фильтрации и стабилизации напряжения на выходе тяговых подстанций постоянного тока целесообразно применять в выпрямительных установках активные фильтры-стабилизаторы последовательного типа на базе емкостного накопителя энергии с повышенной частотой широтно-импульсной модуляции.*

*Обоснованность результатов исследований была подтверждена экспериментально с помощью имитационного компьютерного моделирования.*

**Ключевые слова:** активный фильтр-стабилизатор, преобразовательный агрегат, емкостной накопитель энергии, широтно-импульсная модуляция, импульсное напряжение.

*У даному дослідженні вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо вдосконалення методів покращення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання постійного струму з суміжними електроустановками і підвищення якості енергії живлення електричного рухомого складу залізниць.*

*У процесі досліджень встановлено, що для забезпечення ефективної фільтрації і стабілізації напруги на виході тягових підстанцій постійного струму доцільно застосовувати у випрямних установках активні фільтри-стабілізатори послідовного типу на базі ємнісного накопичувача енергії з підвищеною частотою широтно-імпульсної модуляції.*

*Обґрунтованість результатів досліджень була підтверджена експериментально за допомогою імітаційного комп'ютерного моделювання.*

**Ключові слова:** активний фільтр-стабілізатор, перетворюючий агрегат, ємнісний накопичувач енергії, широтно-імпульсна модуляція, імпульсна напруга.

*In this study, it decided the current scientific and technical project on improving the methods for improving the electromagnetic compatibility of the system of traction power supply of direct current to the adjacent electrical installations and improve the quality of electric energy supply of railway rolling stock.*

*During the study found that for effective filtration and stabilization of the voltage at the output of the DC traction substations it is advisable to apply rectifier Active Filter Settings stabilizers serial type based on capacitive energy storage with high frequency pulse-width modulation. In practice, the operation of electric power systems of transport, the use of passive filtration method has some significant drawbacks, which requires finding more effective methods. The use of passive filter to suppress low frequency harmonics noncanonical is impractical due to significant growth of mass and size parameters.*

*The validity of research results was confirmed experimentally using simulation computer simulation.*

**Keywords:** *active filter-regulator, the converter unit, a capacitive energy storage, pulse width modulation, pulse voltage.*

**Введение.** Улучшение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения постоянного тока со смежными электроустановками и качественное питание электрического подвижного состава на участках с интенсивным и скоростным движением может быть обеспечено при эффективной фильтрации и стабилизации напряжения на выходе тяговой подстанции.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ активных методов фильтрации посвящен целый ряд работ, в которых показана оптимальность применения в мощных системах питания [1-4]. Сравнительный анализ эффективности использования фильтров показывает, что применение пассивных фильтров целесообразно только для подавления канонических гармоник [2]. Применение пассивных фильтров для подавления низкочастотных неканонических гармоник нецелесообразно из-за значительного роста их массогабаритных показателей. Повышение степени фильтрации пульсации достигается применением комбинированных активных систем, которые представляют собой комбинацию соединенных по определенной схеме пассивного и активного звена фильтра [5-7].

**Определение цели и задачи исследований.** Цель и задача исследований заключается в обеспечении необходимой фильтрации и стабилизации выпрямленного напряжения. Это возможно решить путем применения вольтодобавочных

преобразователей на базе трехфазных выпрямителей напряжения с ШИМ на быстродействующих ключах [6-9].

**Основная часть исследования.** Предлагается применить в выпрямительной установке тяговой подстанции активный фильтр-стабилизатор последовательного типа на базе емкостного накопителя энергии, схема которого приведена на рис. 1.

Как видно из схемы, активный фильтр-стабилизатор АФС включен последовательно с выпрямительной установкой ВУ тяговой подстанции, которая представляет собой двенадцатипульсный выпрямитель. Система управления СУ АФС (рис. 1) с другими элементами схемы образует замкнутую систему автоматического регулирования, которая обеспечивает активную фильтрацию и стабилизацию выходного напряжения подстанции.

Схема АФС похожа на схемы активных фильтров последовательного типа, которые были предложены в работах [6, 7]. Как и указанные фильтры, АФС построен на базе емкостного накопителя энергии  $C_n$  (рис. 1), включенного в диагональ мостового коммутатора. Схема коммутатора (преобразователя) АФС упрощена по сравнению с коммутаторами упомянутых активных фильтров: в нем два управляемых ключа (тиристорный  $VS$  на базе  $IGCT$  и транзисторный  $VT$  на базе  $IGBT$ ), другие два ( $VD1$  и  $VD2$ ) являются неуправляемыми ключами. Главное же

отличие заключается в том, что в АФС для заряда  $C_n$  дополнительно предусмотрен выпрямитель заряда ВЗ, мощность которого составляет 10 % мощности основной ВУ, и эта дополнительная

энергия нужна для того, чтобы обеспечивать более эффективную фильтрацию, а главное стабилизацию среднего значения выходного напряжения  $U_{\text{в0}}$  тяговой подстанции.

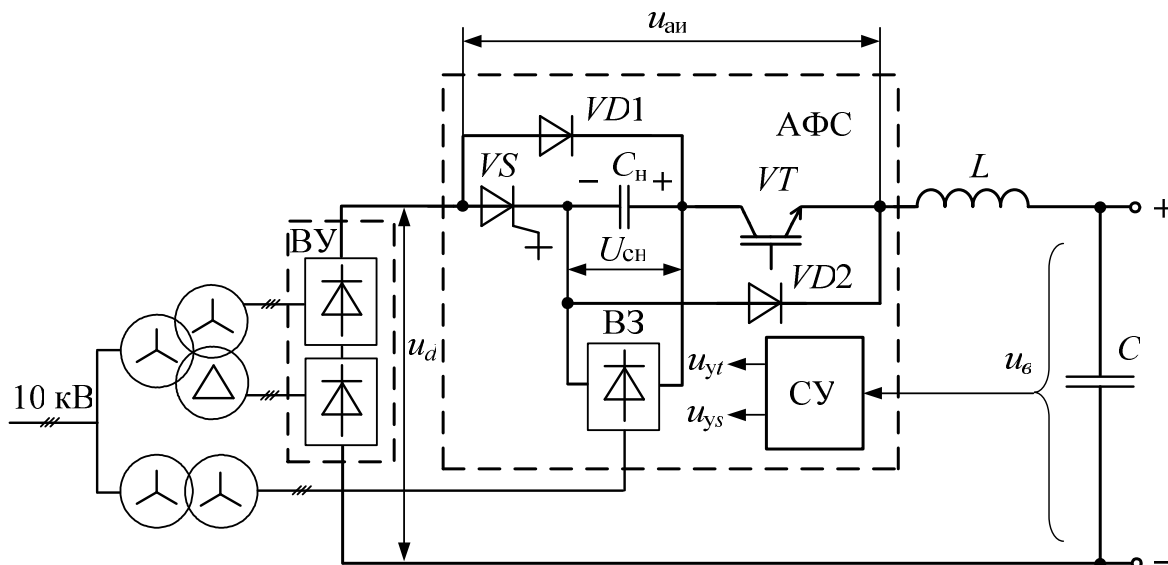


Рис. 1. Схема активного фильтра-стабилизатора последовательного типа

В предлагаемой схеме преобразователь напряжения АФС с напряжения  $U_{\text{сн}}$  формирует импульсное напряжение  $u_{\text{ан}}$ , как показано на рис. 2. С этого напряжения LC-

фильтром выделяется совокупность усредненных на периоде ШИМ значений – гладкая составляющая, показанная штриховой линией на рис. 2 и обозначенная  $u_{\text{ар}}$ .

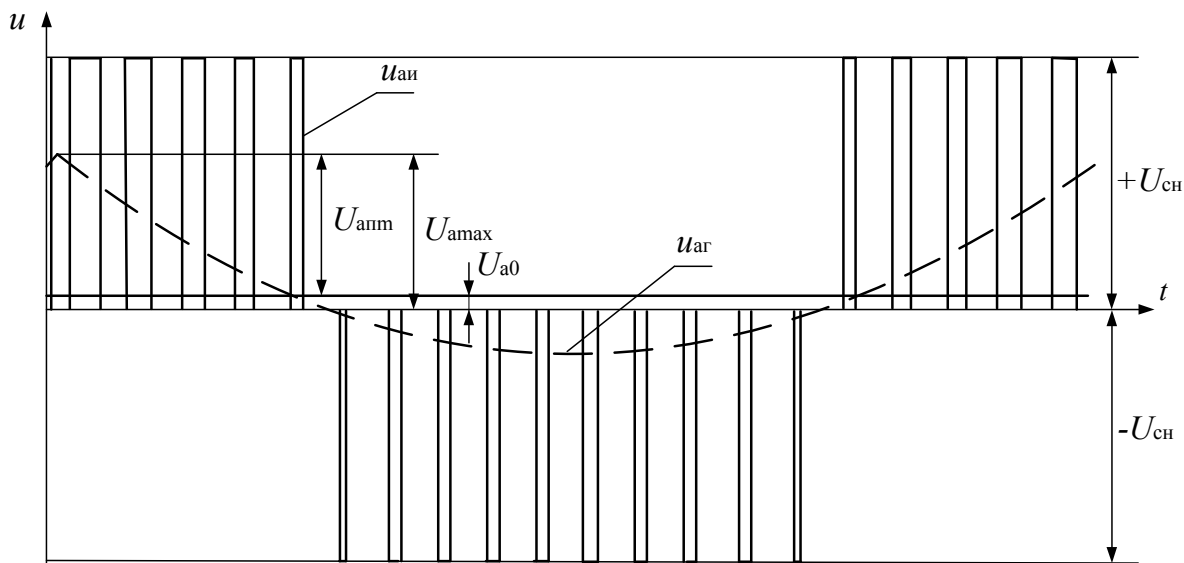


Рис. 2. Диаграмма выходного напряжения активного фильтра-стабилизатора

Напряжение  $u_{ар}$  содержит переменную составляющую  $u_{ап}$ , повторяющую форму и противофазную переменной составляющей выпрямленного напряжения  $u_{дп}$ , поскольку она сформирована для его подавления. Кроме этого, напряжение  $u_{ар}$  имеет и постоянную составляющую  $U_{а0}$ , которая формируется для стабилизации напряжения на выходе тяговой подстанции [8-12].

Для формирования импульсов напряжения положительной полярности  $u_{аи}$  с амплитудой, которая равна напряжению  $U_{сн}$ , включается тиристорный ключ  $VS$  и транзисторный ключ  $VT$  преобразователя АФС. При формировании паузы ключ  $VT$  выключается, диодный ключ  $VD2$  естественно включается и проводит ток вместе с ключом  $VS$ . Для изменения знака напряжения  $u_{аи}$  ключ  $VS$  выключается, а включается низкочастотный диодный ключ  $VD1$ . При выключении  $VT$  естественно включается диодный ключ  $VD2$  и вместе с ключом  $VD1$  формирует импульсы отрицательной полярности с амплитудой  $-U_{сн}$ . Для формирования нулевой паузы ключ  $VT$  преобразователя включается, закрывая при этом ключ  $VD2$ , и проводит ток вместе с  $VD1$ . Преобразователь АФС действует одновременно как инвертор напряжения с однополярной ШИМ при формировании переменной составляющей напряжения  $u_{ап}$  и как широтно-импульсный преобразователь при формировании постоянной составляющей  $U_{а0}$ .

При анализе работы АФС пренебрежем активными потерями в  $LC$ -фильтре и ВУ. На конденсаторе  $LC$ -фильтра с выходного напряжения выпрямителя  $u_d$  и отфильтрованного от гармоник с частотой ШИМ гладкой составляющей напряжения АФС  $u_{ар}$  формируется выходное напряжение подстанции  $u_b$ , определяемое соотношением для схемы (рис. 1)

$$u_b = u_d + u_{ар} + L \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где  $L \frac{di}{dt}$  – напряжение на индуктивности реактора  $L$  пассивного фильтра.

Выходное напряжение подстанции  $u_b$  практически не содержит переменной составляющей, поскольку переменная составляющая напряжения выпрямительной установки  $u_{дп}$  компенсируется напряжением  $u_{ап}$ . Качественное формирование напряжения компенсации достигается применением в преобразователе АФС повышенной частоты ШИМ и емкостного накопителя с низким уровнем пульсации напряжения питания. Таким образом, в установившемся режиме выходное напряжение подстанции будет равно

$$U_{в0} = U_{d0} + U_{а0}. \quad (2)$$

Для анализа основных параметров преобразователя напряжения АФС нужно определить амплитудное значение напряжения  $u_{ар}$ , которое обозначено  $U_{amax}$  на рис. 2. Это значение определяется как сумма постоянной составляющей напряжения  $U_{а0}$ , которая равна отклонению среднего значения выпрямленного напряжения  $\Delta U_{d0}$  от заданного (номинального), и амплитуды положительной полуволны переменной составляющей  $U_{анм}$  (рис. 2), значение которой равно амплитуде отрицательной полуволны переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{днм}$ .

При условии симметрии питающего ВУ трехфазного напряжения и нулевым угле коммутации диодов, если совместить середину отрицательной полуволны переменной составляющей выпрямленного напряжения с началом координат, то зависимость  $u_{дп}(\omega t)$  превратится в четную функцию, которая при разложении в ряд Фурье содержит только косинусные составляющие

$$u_{d\pi}(\omega t) = \sum_{k=m}^{\infty} U_{dk \max} \cos k\omega t, \quad (3)$$

где  $k = qm$ , – номер канонической гармоники выпрямленного напряжения  $u_d$ ;  
 $m = 12$  – пульсность ВУ;  $q = 1, 2, 3, \dots$ ;  
 $U_{dk \max}$  – амплитуда  $k$ -й канонической гармоники напряжения  $u_d$ .

При значении угловой координаты  $\theta = \omega t = \frac{(2n \pm 1)\pi}{m}$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$ , когда

$$U_{a \max} = U_{a0} + U_{апм} = \Delta U_{d0} + \Delta U_{d\gamma} + \sum_{k=m}^{\infty} U_{dk \max} + \sum_{v=2}^{\infty} U_{dv \max}, \quad (5)$$

где  $\Delta U_{d0}$  – снижение постоянной составляющей выпрямленного напряжения, вызванное снижением напряжения питания ВУ;

$\Delta U_{d\gamma}$  – снижение выпрямленного напряжения, обусловленное наличием угла коммутации диодов ВУ;

$U_{dv \max}$  – амплитуда  $v$ -ой неканонической гармоники напряжения  $u_d$ .

Как видно из формулы (5), для определения значения напряжения  $U_{amax}$  необходимо учесть снижение среднего значения выпрямленного напряжения  $\Delta U_{d0}$ , которое пропорционально снижению напряжения питания ВУ, а

$\cos k\omega t = -1$ , модуль амплитуды  $U_{d\pi m}$  определяется из формулы (3) как сумма амплитуд напряжений канонических гармоник

$$|U_{d\pi m}| = \sum_{k=m}^{\infty} U_{dk \max}. \quad (4)$$

Для определения  $U_{d\pi m}$  к суммы из формулы (4) при несимметрии напряжения питания ВУ необходимо добавить еще амплитуду суммарного напряжения неканонических гармоник

также снижение напряжения  $U_{d0}$ , обусловленное наличием угла коммутации диодов [9]:

$$\Delta U_{d\gamma} = U_{d0} \frac{I_d}{I_{dном}} u_k \sin \frac{\pi}{m}, \quad (6)$$

где  $\frac{I_d}{I_{dном}} = I_d^*$  – относительное значение тока ВУ;

$u_k$  – условное напряжение короткого замыкания [9].

Для определения амплитуд неканонических гармоник выпрямленного напряжения используем систему уравнений

$$\bar{U}_v = \begin{cases} \frac{-\varepsilon}{v-1} \cos\left(\frac{v-1}{2}\gamma_0\right) e^{-j\left[(1-v)\left(\alpha_0 + \frac{\gamma_0}{2}\right) - \psi_2\right]}, & \text{для } v = 2(1+3k) \\ \frac{\varepsilon}{v+1} \cos\left(\frac{v+1}{2}\gamma_0\right) e^{-j\left[(1+v)\left(\alpha_0 + \frac{\gamma_0}{2}\right) + \psi_2\right]}, & \text{для } v = 2(2+3k). \end{cases} \quad (7)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что амплитудное значение  $U_{\text{amax}}$  достигает максимума при минимальном напряжении

питания ВУ и максимальной нагрузке, как показано на графике рис. 3.

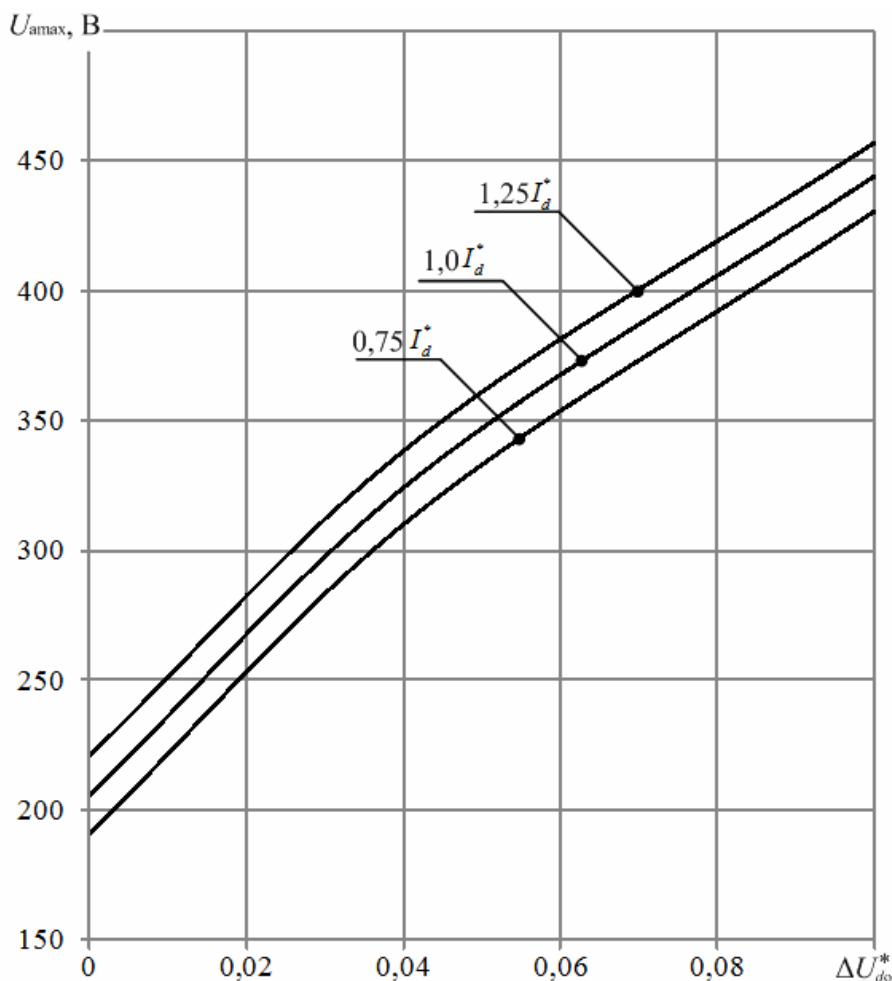


Рис. 3. Зависимость значения напряжения  $U_{\text{amax}}$  от снижения постоянной составляющей выпрямленного напряжения  $\Delta U_{d0}^*$

При построении графика было принято, что максимальная нагрузка соответствует значению тока ВУ  $I_d^*$  0,75; 1,0 и 1,25, а минимальное напряжение питания ВУ на 10 % ниже номинального [7-11]. При заданном номинальном значении выходного напряжения подстанции  $U_{\text{в0ном}} = 3300$  В для АФС в составе преобразовательного агрегата с двенадцатипульсной схемой ВУ согласно уравнению

(6) максимальное значение  $U_{\text{amax}} = 460$  В (рис. 3).

Емкостной накопитель энергии  $C_H$  заряжается током ВЗ, а также током основной ВУ при формировании полуволны напряжения  $u_{\text{ag}}$  отрицательной полярности. Для качественного формирования напряжения  $u_{\text{ag}}$  накопитель должен быть заряжен до напряжения несколько больше  $U_{\text{amax}}$ . Выполним оценочный расчет емкости накопителя

енергии без учета заряда током основной ВУ при формировании импульсов напряжения  $u_{ан}$  отрицательной полярности:

$$C_n = \frac{I_{зп}}{\omega k_{пу} U_{сн}}, \quad (8)$$

где  $I_{зп}$  – переменная составляющая тока заряда емкостного накопителя;

$\omega$  – частота пульсации напряжения емкостного накопителя энергии;

$k_{пу}$  – коэффициент пульсации напряжения (для фильтровых конденсаторов принимают не более 0,04-0,05).

Определив переменную составляющую тока заряда  $I_{зп}$ , получаем согласно уравнению (8) емкость  $C_n = 0,1$  Ф. Эту емкость батареи накопителя энергии реализовать не очень сложно, применив, например, конденсаторы фирмы

*Electronicon Semicode E50.R29* на 2000 мкФ каждый и напряжение 900 В [10-12]. Как преимущество АФС можно отметить то, что для его преобразователя необходимы два неуправляемых и два управляемых ключа, и только один из них на базе *IGBT*. Для реализации вольтодобавочных выпрямителей напряжения с ШИМ [11-12], выполняющих такую же задачу и имеющих такую же мощность, нужны шесть ключей на *IGBT*, последовательно соединенных с диодами, которые защищают транзисторы от обратного напряжения.

Предложена замкнутая система выпрямительного агрегата подстанции с активным фильтром-стабилизатором, представленная на рис. 4, которая должна обеспечивать автоматическое регулирование выходного напряжения с целью его стабилизации и подавления пульсации.

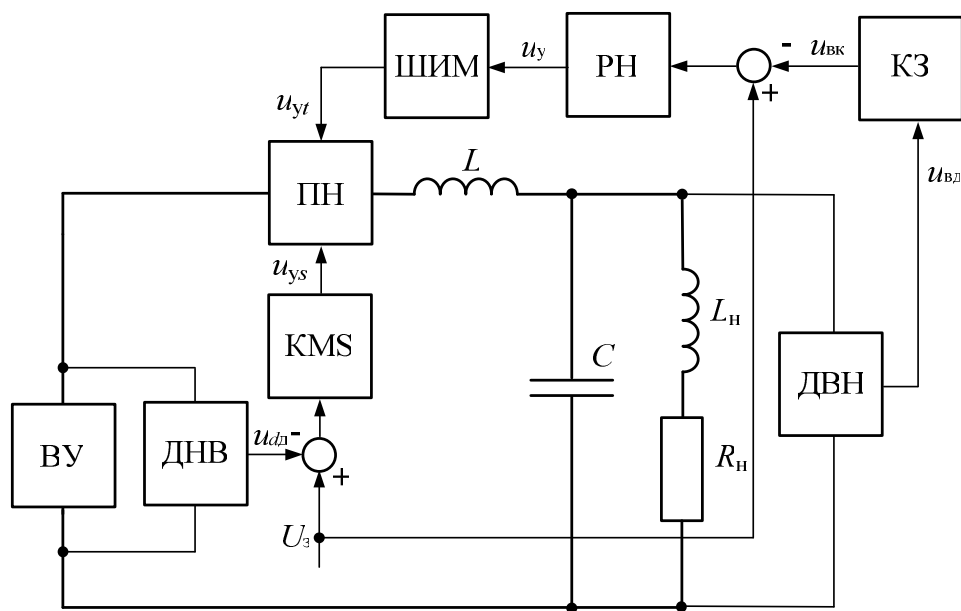


Рис. 4. Замкнутая система автоматического регулирования выходного напряжения

В замкнутой системе автоматического регулирования датчик выходного напряжения ДНВ передает сигнал о постоянной и переменной составляющих

выходного напряжения подстанции. От ДВН сигнал  $u_{вд}$  подается на корректирующее звено КЗ, после чего сигнал  $u_{вк}$ , как сигнал отрицательной

обратной связи по напряжению, сравнивается с напряжением задания  $U_3$  на входе регулятора напряжения РН (рис. 4). Разностный сигнал ( $U_3 - u_{BK}$ ) содержит постоянную и переменную составляющие, несущие информацию об отклонении от заданного выходного напряжения  $U_{B0}$  и о пульсации этого напряжения  $u_{BП}$ . Регулятор напряжения РН вырабатывает сигнал управления  $u_y$ , по которому преобразователем напряжения ПН формируется компенсирующее напряжение с целью стабилизации и подавления переменной составляющей выходного напряжения тяговой подстанции.

Импульсы управления транзисторным ключом  $u_{yt}$  преобразователя АФС вырабатываются широтно-импульсным

модулятором ШИМ. С помощью датчика напряжения выпрямителя ДНВ информация о мгновенном значении выходного напряжения двенадцатипульсовой выпрямительной установки ВУ  $u_{dд}$  подается на схему сравнения, где оно сравнивается с напряжением задания  $U_3$ . Компаратор КМС преобразует результирующий сигнал в импульсный сигнал управления тиристорным ключом  $u_{ys}$  преобразователя АФС.

Для проверки и подтверждения достоверности результатов теоретических исследований была разработана имитационная компьютерная модель активного фильтра-стабилизатора последовательного типа в среде MATLAB (рис. 5).

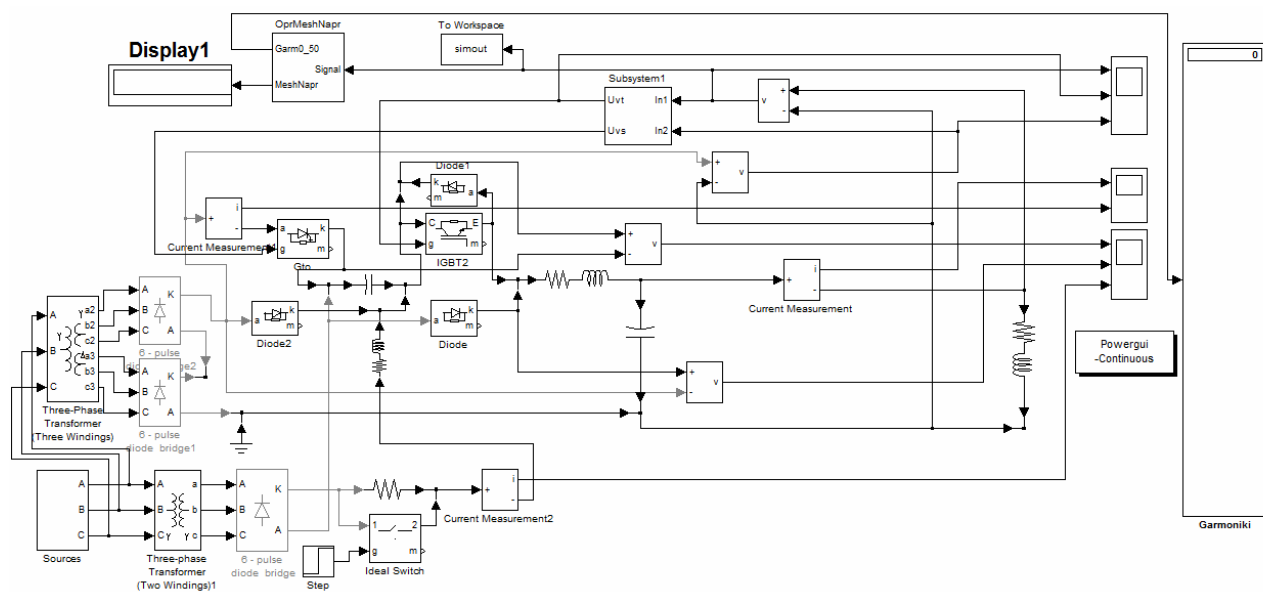


Рис. 5. Имитационная компьютерная модель активного фильтра-стабилизатора последовательного типа в среде MATLAB

На рис. 6 представлены графики, где кривая (а) соответствует напряжению на нагрузке без активного фильтра-стабилизатора, а кривая (б) – при замкнутой обратной связи и работе активного фильтра-стабилизатора. Из рис. 6 видно, что наличие несимметрии входного

напряжения выпрямителя приводит к появлению неканонических гармоник в выпрямленном напряжении. При работе схемы с разомкнутой обратной связью относительная амплитуда субгармоник частотами 100 Гц и 200 Гц равна соответственно 2,5 % и 2,4 %, коэффициент



пульсаций THD = 3,94 %, а эквивалентное мешающее напряжение  $U_{эм} = 15,78$  В. При замкнутой обратной связи относительная амплитуда субгармоники частотами 100 Гц

равен 0,03 %, а коэффициент пульсаций THD = 0,03 %, а эквивалентное мешающее напряжение  $U_{эм} = 0,35$  В.

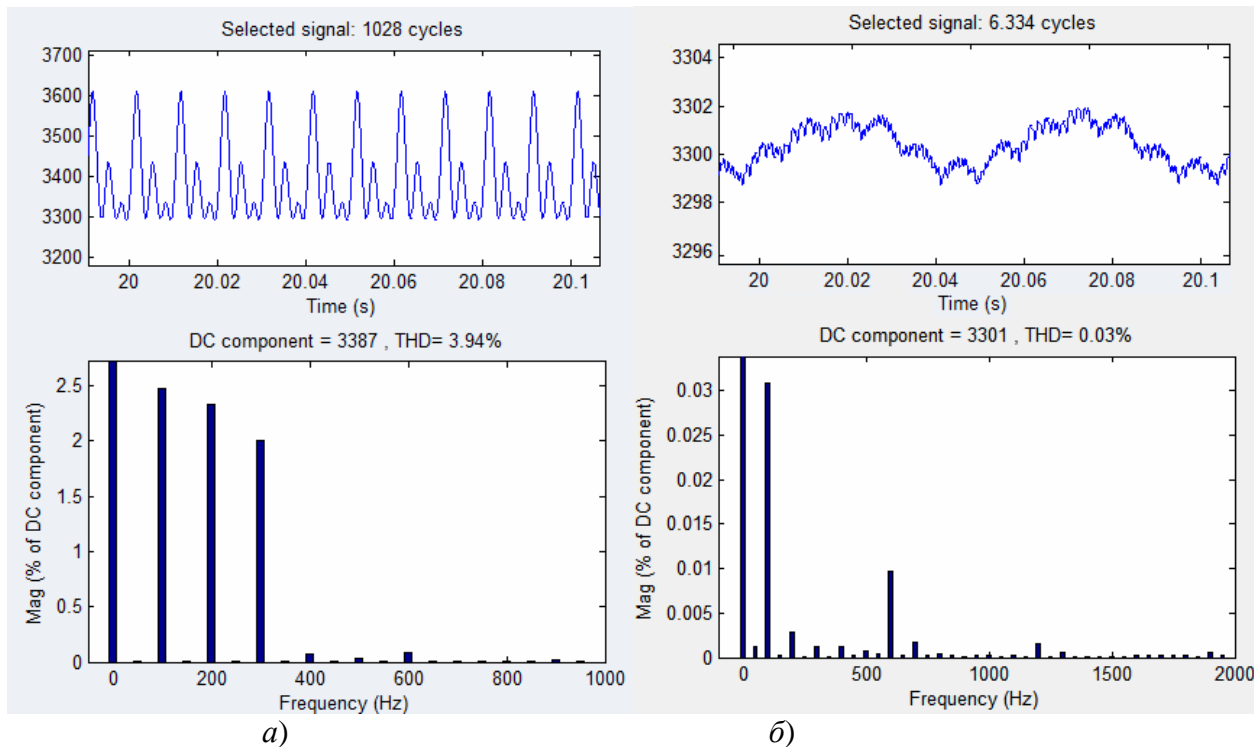


Рис. 6. Графики напряжения нагрузки без активного фильтра-стабилизатора (а) и с ним (б)

**Выводы.** Для повышения эффективности работы выпрямительной установки тяговой подстанции постоянного тока на участках с интенсивным и скоростным движением целесообразно применение активного фильтра-стабилизатора последовательного типа на базе емкостного накопителя энергии, что обеспечивает снижение пульсаций выходного напряжения в широком диапазоне частот, а

также позволяет поддерживать стабильный уровень выходного напряжения тяговой подстанции постоянного тока. Количество силовых ключей АФС, потери энергии и стоимость при этом будут ниже, чем у вольтодобавочных преобразователей на базе трехфазных выпрямителей напряжения с ШИМ, а качество выходного напряжения выпрямительной установки будет выше.

*Список использованных источников*

1. Ana Vladan Stankovic, Thomas A. Lipo, A Novel Control Method for Input Output Harmonic Elimination of the PWM Boost Type Rectifier Under Unbalanced Operating Conditions, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO.5, 2001, 603 – 611.
2. Design considerations for maintaining DC side voltage of hybrid active power filter with injection circuit/ A.Luo, Z.Shuai, J.Shen [et. al.] // Power Electronics, IEEE Transactions. – 2009. – vol. 24. – P. 75-84.

3. Самсонкин, В. М. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации гармоник выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжения 3 кВ [Текст] / В.М. Самсонкин, М.В. Панасенко, Ю.П. Гончаров, В. В. Божко. – Дніпропетровськ: Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2008. – Вип. 20. – С. 66-72.

4. Гончаров, Ю. П. Тяговий випрямляч з реверсивним вольтододатком на двохоперативних напівпровідникових приладах [Текст] / Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, В.В. Божко. – К.: Технічна електродинаміка. Інститут електродинаміки НАН України, 2008. – Ч.2. – С. 16-21.

5. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [Текст]: № ЦЕ-0009. – К.: ТОВ „Швидкий рух”, 2005. – 80 с.

6. Семененко, О. І. Підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму [Текст] / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 47-54.

7. Гончаров, Ю. П. Система електроснабження контактної мережі постійного струму з подольною лінією підвищеного напруги [Текст] / Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, В.Н. Козачок [и др.] // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 42-48.

8. Ling Su, Dong-yuan Zhao, Jian-ye Chen, Zan-ji Wang. Digital controller for hybrid filter in HVDC based on approximate inverse system. *Frontiers Of Electrical And Electronic Engineering In China*. – 2005. – Vol. 1. – № 4. – P. 367-370.

9. G.T. Heydt, Y. Liu, “Second harmonic components in power system voltages and currents”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2006, P. 521-523.

10. Барковский, Б. С. Двенадцатипульсные полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко [и др.]; под ред. М.Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

11. Семененко, О. І. Випрямний агрегат тягової підстанції з вольтододавальною перетворювачем з широтно-імпульсною модуляцією на базі ємнісного накопичувача енергії [Текст] / О. І. Семененко, Ю. О. Семененко // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: матеріали 78-ї між нар. наук.-тех. конф. 26 — 28 квітня 2016 р.: у зб. наук. праць Укр. держ. універ. заліз. тр-ту. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160, дод. – С. 49-50.

12. Пристрій для компенсації пульсацій вихідної напруги перетворювача електричної енергії [Текст]: пат. № 107897, Україна, МПК H02M 1/14 / Щербак Я.В., Семененко Ю.О., Івакіна К.Я.; заявник і власник патенту на корисну модель Український державний університет залізничного транспорту. – № a201512718; заяв. 23.12.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. – С. 4.

13. Семененко, Ю. О. Випрямна установка тягової підстанції постійного струму з активним фільтром-стабілізатором [Текст] / Ю. О. Семененко // «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті», 29-та міжн. наук.-практ. конф. 27–29 вересня 2016 р. – Чорноморськ, 2016. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. № 4 (119) Дод. – С.

14. Обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць технічне обслуговування та ремонт привила [Текст]: № ЦЕ-0045, затв. наказом Укрзалізниці від 28.07.2014 р. № 441-Ц/од. Інструкція. – К.: 2016. – 57 с.

---

Семененко Юрій Олександрович, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Semenenko Yuriy Oleksandrovych, assistant Department of electricity, electrical engineering and electrical engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Стаття прийнята 12.12.2016 р.