

# МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТІ ІМПУЛЬСНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

## Вступ

Стабілізатори постійної напруги – одні з найбільш поширених систем силової електроніки. Однією з найважливіших задач, що вирішуються в процесі розробки таких систем, є забезпечення необхідної точності стабілізації з урахуванням специфіки зовнішніх впливів по живленню, навантаженню й керуванню [1]. Багатоманітність принципів побудови і видів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що застосовуються в системах стабілізації постійної напруги, визначає і різні показники їх точності в статичних і динамічних режимах. Однак, на цей час порівняльної оцінки показників якості цих принципів не існує. Стаття вирішує ці питання засобами електронного моделювання.

## Принципи побудови систем стабілізації напруги

Системи стабілізації постійної напруги загальнопромислового призначення зазвичай виконуються за компенсаційним принципом, який ілюструє структурна схема, представлена на рис.1. Вона містить задавач (З), що слугує для створення керуючого сигналу, що порівнюється з вихідним сигналом давача (Д). Помилка керування подається на регулятор (Р), структура і параметри якого визначаються з умов забезпечення необхідної якості динаміки. Сигнал з регулятора надходить до системи керування (СК), яка керує ключами широтно-імпульсного перетворювача (ШІП). Перетворювач підключений до вхідного джерела живлення  $U_{ВХ}$ .

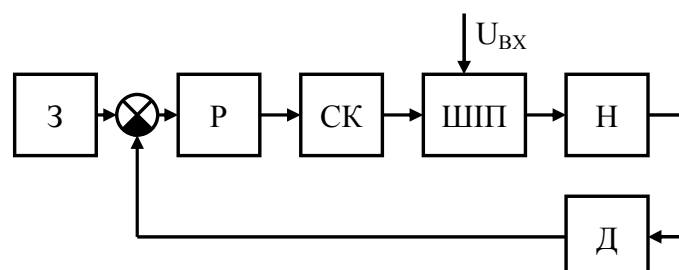


Рисунок 1 – Структурна схема імпульсного стабілізатора напруги

ШІП, в залежності від величини і знаку вихідної напруги, може бути таким, що знижує, підвищує чи інвертує. У випадку, якщо стабілізується низька напруга з великим вихідним струмом, що має місце в схемах жив-

лення процесорів мобільних телефонів, персональних комп'ютерів, цифрових камер, застосування звичайного знижувального ШПП недоцільно по причині збільшення втрат на зворотному діоді. Цей недолік можна усунути в синхронному знижувальному ШПП (рис.2), в якому діод замінений МДН-транзистором VT2. Транзистори VT1 и VT2 в цьому випадку працюють в протифазі.

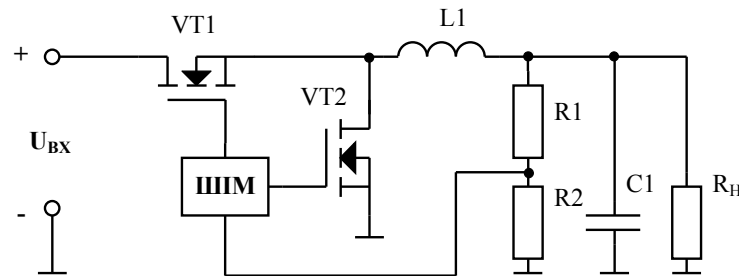


Рисунок 2 – Стабілізатор напруги з синхронним знижувальним ШПП

Для живлення навантажень, де не важливі високі вимоги до стабілізації вихідної напруги, широке застосування знайшли одноконтурні схеми стабілізаторів, рис.3.

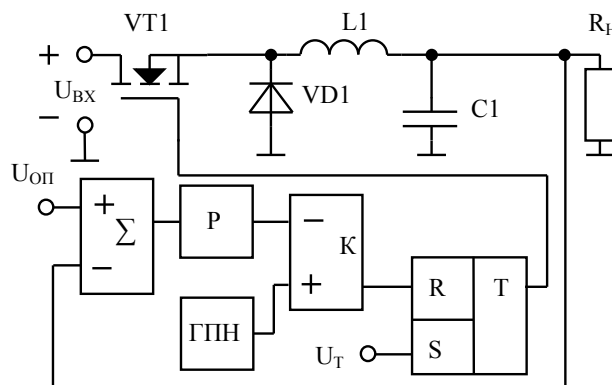
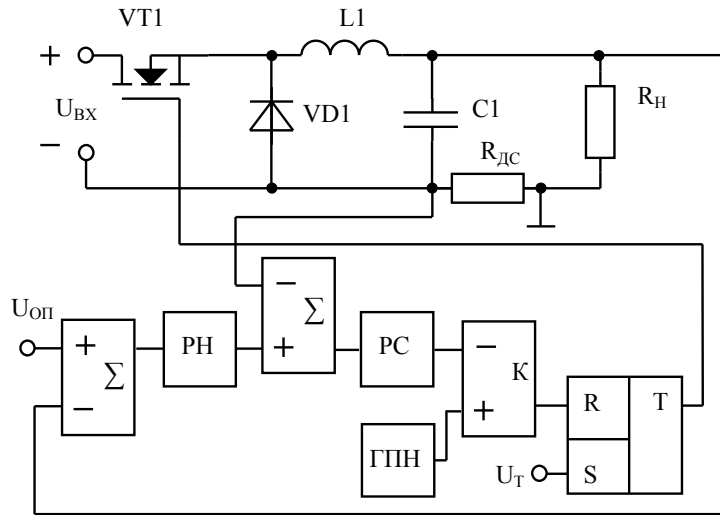


Рисунок 3 – Одноконтурна система стабілізації напруги з ШПМ

Основними елементами системи керування таких схем є віднімач ( $\Sigma$ ), регулятор (P), генератор пилкоподібної напруги (ГПН) і компаратор (K). Такі стабілізатори використовуються в системах електроживлення побутової апаратури.

У випадку, якщо потрібно забезпечити високу швидкодію стабілізатора, потрібен додатковий швидкодіючий контур зворотного зв'язку (ЗЗ). Найбільш поширеними є системи з внутрішнім контуром по струму, сигналом зворотного зв'язку в якому є струм дроселя фільтру (рис.4). Швидкодія такого контуру в 5-6 разів перевищує швидкодію зовнішнього контуру.

Використання контуру струму дозволяє обмежити струм силових транзисторів на кожному періоді роботи ШПП, а також збільшити швидкодію при зміні вхідної напруги, що дозволило використовувати такі принципи в мікросхемах, що серійно випускаються [2].

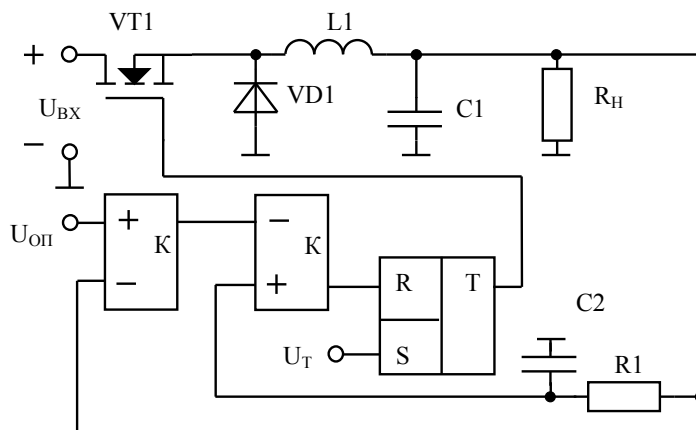


*ГПН – генератор пилоподібної напруги; К – компаратор;  
 РН – регулятор напруги; РС – регулятор струму*

*Рисунок 4 – Двоконтурна система стабілізації напруги*

Недоліком систем з внутрішнім зв'язком по струму є їх порівняно невелика швидкодія при зміні струму навантаження [3].

Метод керування  $V^{2TM}$ , розроблений компанією Cherry Semiconductor (рис.5), в якості сигналу ЗЗ використовує напругу, сформовану на еквівалентному послідовному опорі вихідного конденсатора фільтру перетворювача [4].



*Рисунок 5 –  $V^{2TM}$  керування*

Ця напруга пропорційна змінному струму, що протікає по дроселю фільтру. Перевагами такого методу є висока швидкодія як при зміні вхідної напруги, так і при зміні струму навантаження. Метод  $V^{2TM}$  використовується в мікросхемах серії CS51xx, що працюють з частотою до 1 МГц, й широко застосовуються в материнських платах сучасних персональних комп'ютерів для формування напруги живлення мікропроцесорів.

## Показники точності керування одноконтурних стабілізаторів постійної напруги

Найбільш зручним засобом моделювання різноманітних систем на сьогоднішній день є пакет Matlab, що включає програму Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації і аналізу динамічних систем [5]. Simulink повністю інтегрований до Matlab, що забезпечує широкі можливості аналізу й обробки отриманих при моделюванні даних. Аналізувати роботу систем силової електроніки можна з використанням вже створених елементів – польових транзисторів, IGBT, діодів, що містяться в пакеті SimPower Systems Simulink [6]. Для прискорення роботи доцільно створювати m-файли – текстові файли, що містять код Matlab: оператори розгалуження, цикли, функції запуску моделювання систем й обробки отриманих даних.

Модель одноконтурного стабілізатора постійної напруги з ШІМ в пакеті Matlab показана на рис.6.

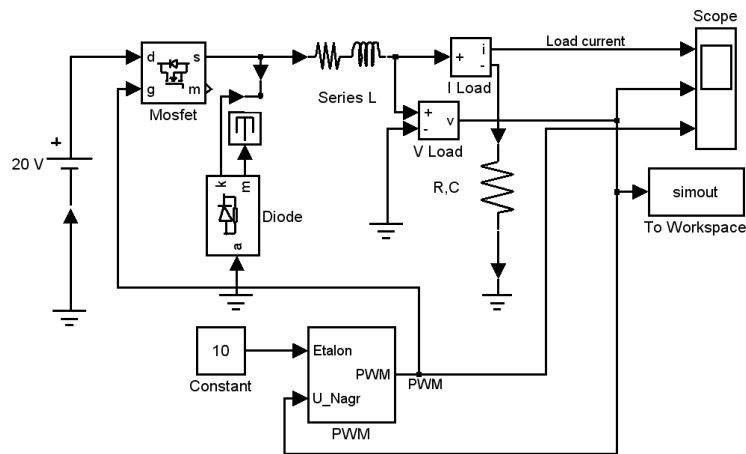


Рисунок 6 – Matlab-модель імпульсного стабілізатора постійної напруги з ШІМ

Для силової частини системи використовувались моделі SimPowerSystems, а для системи керування – моделі Simulink. Силова частина – знижувальний перетворювач з RL-навантаженням, що складається з блоків *DC voltage source*, *Mosfet*, *Series L*, *Diode*, і *R,C*. Дросель *Series L* має омичний опір  $R_L=0,4$  Ом.

Для спостереження сигналів використовуються вимірювачі напруги й струму (*V Load* й *I Load* відповідно), та блоки *Scope*. Вибір типу модуляції здійснюється в системі керування (підсистема *PWM*, рис.7) зміною параметрів блоків *Repeating Sequence* і *Trigger*.

Сигнал з навантаження перетворювача подається на вхід системи керування, де віднімається з задавача (блок *Constant*). Отримана помилка потрапляє в пропорційний регулятор, реалізований блоком *Gain2*, й фіксується до наступного періоду (блок *Zero-Order Hold*), чим реалізується ШІМ-1. Без блоку *Zero-Order Hold* реалізується ШІМ-2. Генератор пилоподібного сигналу частотою 10 кГц виконаний на блоках *Pulse Generator1* і *Repeating Sequence*. Компаратор складається з віднімача й обмежувача (*Saturation*).

Вхідна напруга для всіх стабілізаторів прийнята однаковою:  $U_{BX}=20$  В, вихідна  $U_{ВИХ}=10$  В.

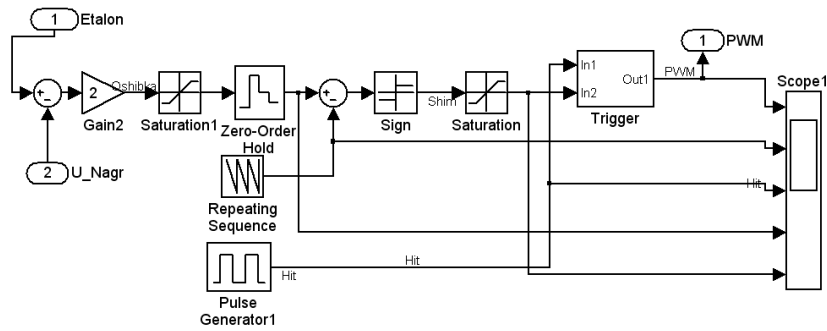


Рисунок 7 – Блок *PWM* моделі стабілізатора напруги при модуляції переднього фронту

За результатами моделювання отримана залежність статичної помилки системи від коефіцієнту підсилення П-регулятора  $K_P$  при різних значеннях відносної постійної часу навантаження  $\alpha=T \cdot R_H/L_H$  і модуляції заднього фронту (рис.8 а). Парні криві відповідають модуляції переднього фронту, непарні – модуляції заднього фронту, криві 1 і 2 побудовані при  $\alpha=0.2$ , криві 3 і 4 – при  $\alpha=0.5$ , криві 5 і 6 – при  $\alpha=0.8$ .

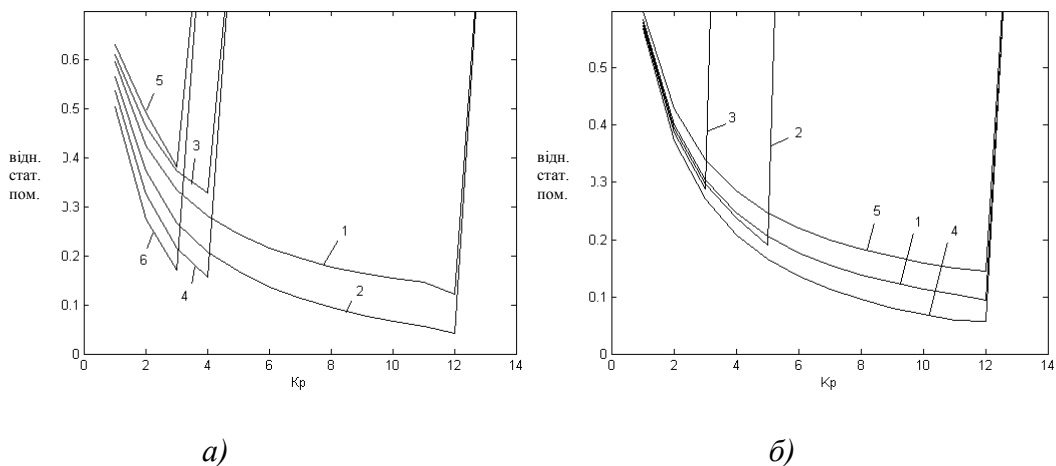


Рисунок 8 – Статична помилка системи при модуляції заднього й переднього фронтів (а), при двобічній модуляції (б)

З рис.8 а видно, що статична помилка в системі з ШІМ-1 заднього фронту менше, ніж при модуляції переднього фронту. Цей результат можна пояснити тим, що для ШІМ заднього фронту в момент фіксації напруга на навантаженні буде мінімальною, в той час як для ШІМ переднього фронту – максимальною. Це явище найбільш помітне при "швидкому" навантаженні. При двобічній модуляції статична помилка практично не залежить від постійної часу навантаження (рис.8 б). Залежності 1-3 на рис.8 побудовані для двобічньої модуляції при  $\alpha=0.2, 0.5, 0.8$  відповідно, залежності 4 і 5 – для модуляції заднього і переднього фронтів при  $\alpha=0.2$ .

Виходячи з цього, системи з ШІМ-1 й модуляцією обох боків доцільно використовувати у тих випадках, коли параметри навантаження змінюються в процесі роботи системи.

Одним з найважливіших критеріїв оптимізації систем силової електроніки також є мінімум помилки регулювання, найбільш універсальним показником якої є сумарна квадратична оцінка, що залежить від характеру перехідного процесу. Для розрахунку сумарної квадратичної помилки (СКП) в середовищі Matlab був створений m-файл, який запускає моделювання стабілізатора напруги (рис.6), приймає дані з блоку *Simout*, й опрацьовує їх. З урахуванням того, що розрахунок проводився для перших 1000 періодів ШІМ, СКП можна розрахувати за формулою:

$$I_2 = \sum_{i=0}^{1000} (U_{1000} - U_i)^2, \quad (1)$$

де  $I_2$  – сумарна квадратична помилка регулювання,

$U_{1000}$  – напруга на навантаженні на початку 1000-го періоду ШІМ, В,

$U_i$  – напруга на навантаженні на початку  $i$ -го періоду ШІМ, В.

Залежність СКП для одноконтурної системи стабілізації напруги з модуляцією заднього фронту, RL-навантаженням і П-регулятором (рис.6) показана на рис.9 (а – ШІМ-1, б – ШІМ-2). Криві 1-4 побудовані при відносній постійній часу навантаження  $\alpha=0,1; 0,2; 0,5; 0,8$ .

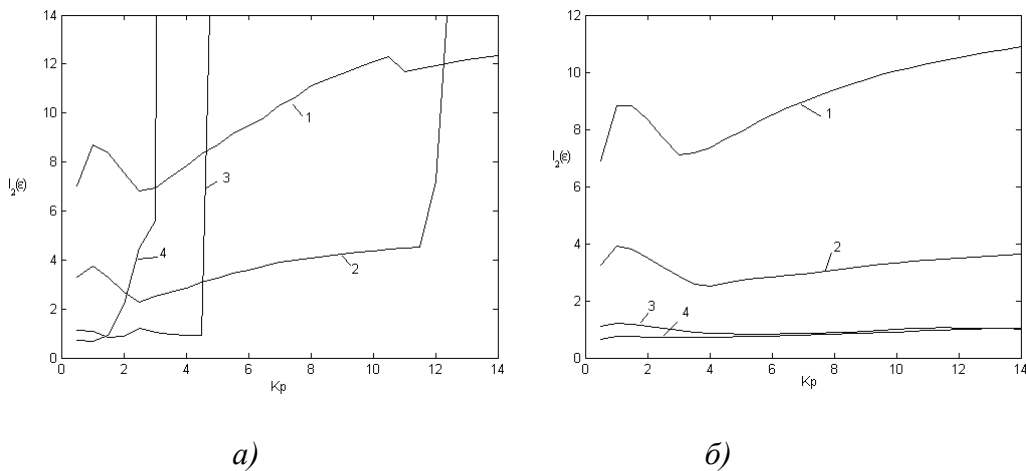


Рисунок 9 – Залежність СКП регулювання при модуляції заднього фронту при різних значеннях  $\alpha$

Як видно з рис.9, для системи з модуляцією заднього фронту СКП зменшується зі збільшенням  $\alpha$ , проте, одночасно з цим зменшується діапазон стійкості. Всі залежності на рис.9 умовно можна поділити на 4 ділянки. На першій ділянці (значення коефіцієнту підсилення регулятора  $K_p < 1$ ) ріст СКП відбувається за рахунок того, що вихідна напруга прийматиме невеликі значення, і сильно залежатиме від  $K_p$ . Друга ділянка характеризується зменшенням помилки регулювання, оскільки ріст вихідної напруги буде вже не таким швидким як зменшення часу перехідного процесу. На третій ділянці СКП буде поступово збільшуватись, оскільки тривалість перехідного

процесу вже досягла свого мінімального значення, а усталене значення напруги поступово збільшується. Різде збільшення помилки на четвертій ділянці відповідає початку субгармонічних коливань в системі і втраті стійкості.

Подібні залежності по результатах моделювання були побудовані і для систем з модуляцією переднього фронту (рис.10 а – ШИМ-1, б – ШИМ-2) і двобічною модуляцією (рис.11 а – ШИМ-1, б – ШИМ-2). Криві 1-4 побудовані для  $\alpha=0,1; 0,2; 0,5; 0,8$  відповідно.

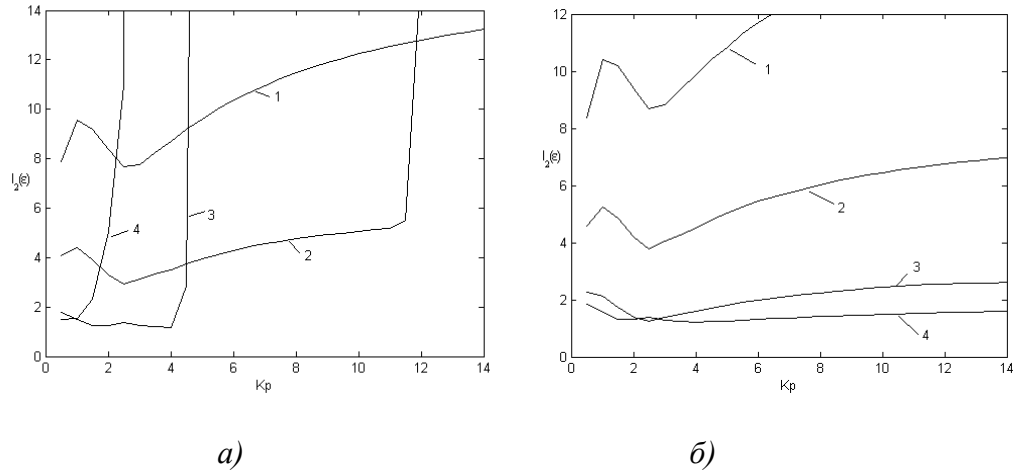


Рисунок 10 – Залежність СКП при модуляції переднього фронту

В системах, де має місце модуляція другого роду (ШИМ-2), динамічна помилка збільшується, проте, діапазон стійкої роботи буде більшим.

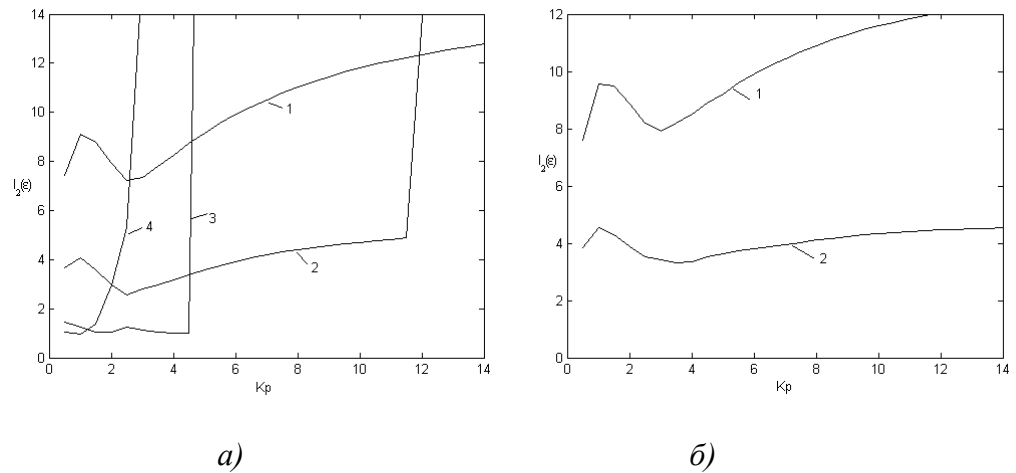


Рисунок 11 – Залежність СКП при модуляції переднього фронту

### **Моделювання двоконтурних систем стабілізації напруги**

Більше поширення знайшли двоконтурні астатичні системи стабілізації, модель такої системи наведена на рис.12.

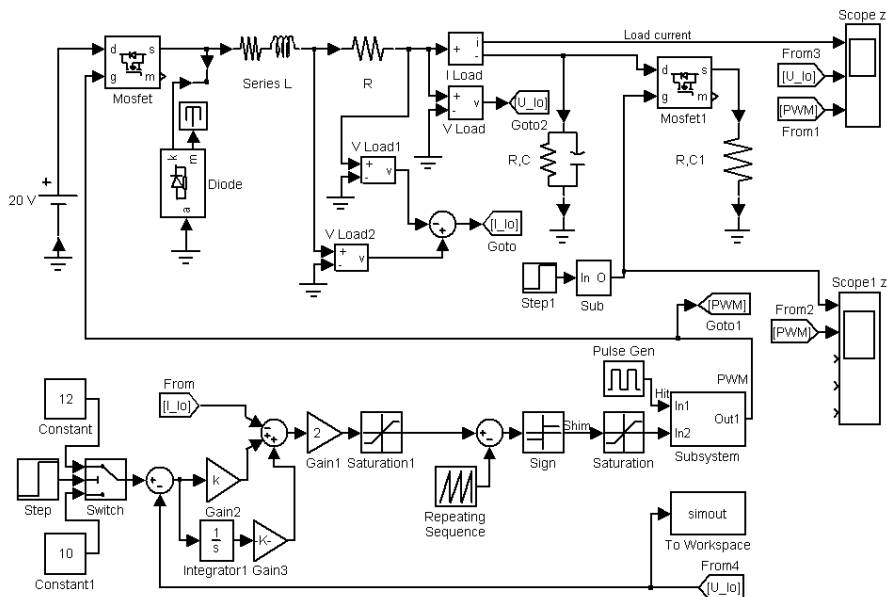


Рисунок 12 – Модель двоконтурного стабілізатора напруги

Блоки *Gain2*, *Integrator1* та *Gain3* реалізують пропорційно-інтегруючий (ПІ), а *Gain1* – пропорційний регулятор. Блоки *Constant*, *Constant1*, *Step* та *Switch* дозволяють ступенєво змінювати напругу задавача, а *Mosfet1*, *Step1*, *Sub* та *R,C1* – навантаження.

**СКП при зміні вхідної напруги.** Залежності квадратичної помилки стабілізації для такої системи при зміні пропорційної складової ПІ-регулятора наведені на рис.13. Моделювання проводилось при  $L_{\Phi}=2$  мГн,  $C_{\Phi}=10$  мкФ,  $T_{\text{ШИМ}}=0,1$  мс,  $U_{\text{ВХ}}=20$  В та ШІМ-2 заднього фронту. Криві 1-3 побудовані для  $R_{\text{Н}}=1, 5, 10$  Ом відповідно.

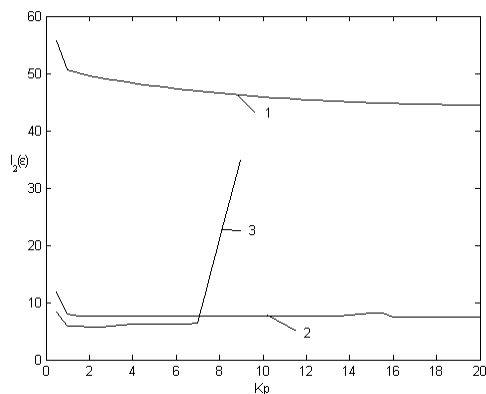


Рисунок 13 – СКП двоконтурної системи стабілізації при зміні вхідної напруги

Результати моделювання показали, що завдяки використанню ПІ-регулятора статична помилка зменшилась до нуля, однак, динамічна помилка при цьому збільшилась.

**СКП при зміні навантаження.** Моделювання роботи стабілізатора напруги при зміні опору навантаження є актуальним, оскільки аналітичної передатної функції по навантаженню для дискретних систем не існує. Зале-



жності СКП від пропорційної складової ПІ-регулятора при зменшенні опору навантаження показані на рис.14 а. Крива 1 побудована при ступеневій зміні опору навантаження від 5 до 2,5 Ом, крива 2 – при зміні від 10 до 5 Ом. Як видно з рис.14 а, зі збільшенням  $K_p$  динамічна помилка регулювання зменшується. Ділянка нестійкої роботи системи показана штриховою лінією.

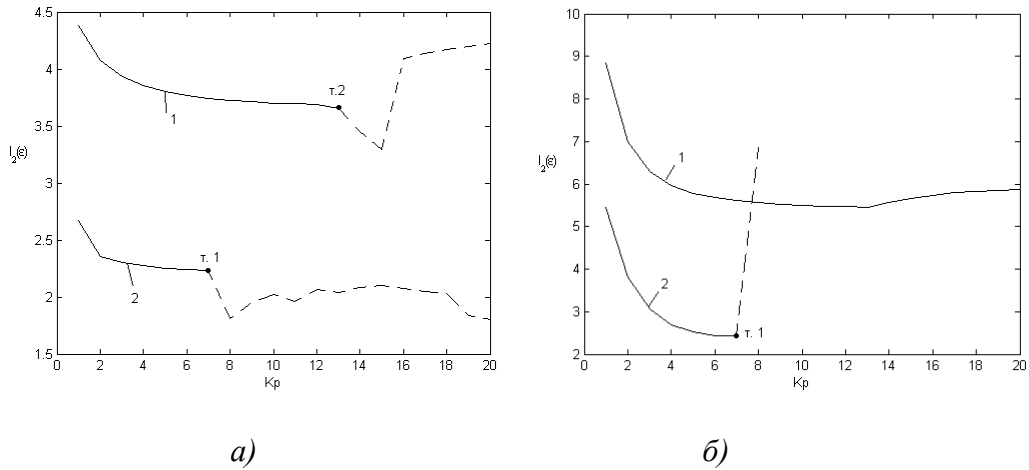


Рисунок 14 – Залежності СКП двоконтурної системи стабілізації при збільшенні (а) та зменшенні опору навантаження (б)

Подібний вигляд має залежність СКП і при збільшенні опору навантаження (рис.14 б). Крива 1 побудована при зміні  $R_H$  від 2,5 до 5 Ом, крива 2 – при зміні від 5 до 10 Ом.

Модель стабілізатора постійної напруги з  $V^2^{TM}$  керуванням показана на рис.15.

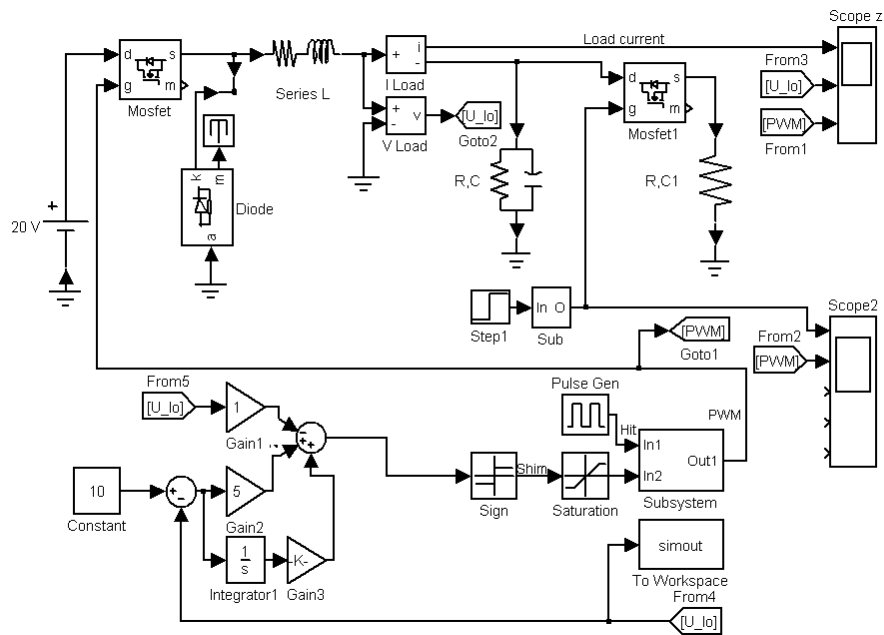


Рисунок 15 – Matlab-модель стабілізатора постійної напруги з  $V^2^{TM}$  керуванням

Для покращення якості керування в основному контурі використовується ПІ-регулятор (реалізований блоками *Gain2*, *Gain3*, *Integrator1*), що дозволяє зменшити до нуля статичну помилку. Як показали результати моделювання,  $V^{2TM}$  метод у порівнянні з класичним методом (рис.12) забезпечує мінімальний час перехідного процесу. Перехідні характеристики стабілізаторів напруги при  $R_H=1$  Ом,  $L_\Phi=2$  мкГн  $C_\Phi=1000$  мкФ показані на рис.16 (1 – система з внутрішнім контуром струму, 2 –  $V^{2TM}$  керування). Однак, слід зазначити, що стійка робота  $V^{2TM}$ -моделі спостерігалась тільки в режимі переривчастих струмів, що обмежує її застосування.

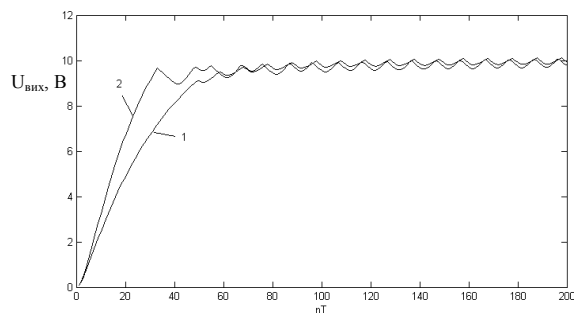


Рисунок 16 – Перехідні характеристики стабілізаторів постійної напруги

## Висновки

1. За результатами моделювання встановлено, що статична помилка регулювання найменша в системах стабілізації постійної напруги, де реалізована ШІМ-1 заднього фронту, у порівнянні з іншими видами ШІМ.

2. В системах, де навантаження змінюється в широкому діапазоні, найбільш доцільно використовувати двобічну модуляцію першого роду, яка забезпечує сталість помилки регулювання при зміні параметрів навантаження.

3. Системи з  $V^{2TM}$  керуванням забезпечують найменший час встановлення перехідного процесу у порівнянні з іншими видами двоконтурних систем.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чети П. Проектирование ключевых источников электропитания. – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 240 с.
2. MCP1601 500 mA Synchronous Buck Regulator. Data Sheet. DS21762A. Microchip, 2003. – 22 p.
3. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. Издание 2-е. – М.: Додэка, 2000. – 608 с.
4. CS5165. Fast, Precise 5-Bit Synchronous Buck Controller for the Next Generation Low Voltage Pentium® II Processors. Data Sheet CS5165. Cherry Semiconductor Corporation, June 1999. – 20 p.
5. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона принт, 2002. – 304 с.
6. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.