

## 2.7. ИМПУЛЬСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

**Цель работы.** Объектом исследования в лабораторной работе является импульсный стабилизатор напряжения (ИСН) с пропорционально-интегральным регулятором (ПИ-регулятором). Целью лабораторной работы является исследование процессов в ИСН с ПИ-регулятором, параметры которого синтезированы по критерию максимизации степени устойчивости.

### 2.7.1. Принцип работы ИСН

В лабораторной работе исследуется импульсный стабилизатор постоянного напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Силовая часть стабилизатора (рис. 2.7.1) включает регулирующий транзистор  $VT$ , сглаживающий  $LC$ -фильтр и активную нагрузку  $R_H$ .

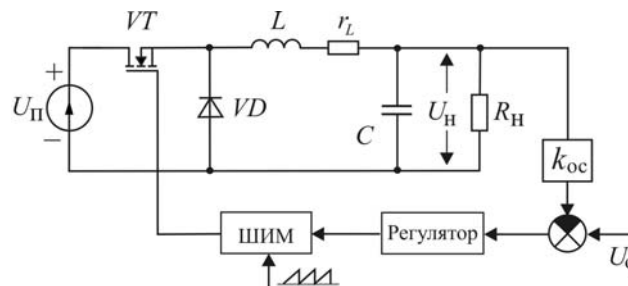


Рис. 2.7.1. Схема ИСН

Регулирующий транзистор  $VT$  работает в ключевом режиме, находясь в одном из двух состояний: открытом или закрытом. При открытом регулирующем транзисторе  $VT$  нестабилизированное напряжение  $U_{п}$  первичного источника поступает на вход сглаживающего фильтра. Ток протекает через первичный источник, дроссель и параллельно включенные конденсатор и нагрузку. Диод  $VD$  ток не пропускает. Когда регулирующий транзистор  $VT$  закрыт, напряжение на входе сглаживающего фильтра отсутствует. Ток, протекающий через диод  $VD$ , поддерживается за счет энергии, накопленной в дросселе конденсаторе.

Устройство управления содержит делитель напряжения с коэффициентом передачи  $k_{oc}$ , схему сравнения, в которой выходное напряжение делителя сравнивается с опорным напряжением  $U_0$ , регулятор и широтно-импульсный модулятор ШИМ. Широтно-импульсный модулятор осуществляет переключение регулирующего транзистора с периодом  $T$  и относительной длительностью  $\gamma$  открытого состояния транзистора  $VT$ .

## 2.7.2. Математическая модель силовой части ИСН

Точная математическая модель ИСН, учитывающая все особенности протекающих процессов, оказывается очень сложной и практически непригодной для инженерных расчетов. Поэтому при проектировании импульсных стабилизаторов часто применяют линейные непрерывные модели, полученные методом усреднения переменных. При этом пульсирующие напряжения и токи заменяются значениями, средними за период. Такие модели дают приемлемые результаты при малых отклонениях от установившегося режима и относительно высокой частоте коммутации силовых ключей.

Предположим, что в ИСН установился периодический процесс с периодом  $T$  и относительной длительностью  $\gamma$  замкнутого состояния ключа.

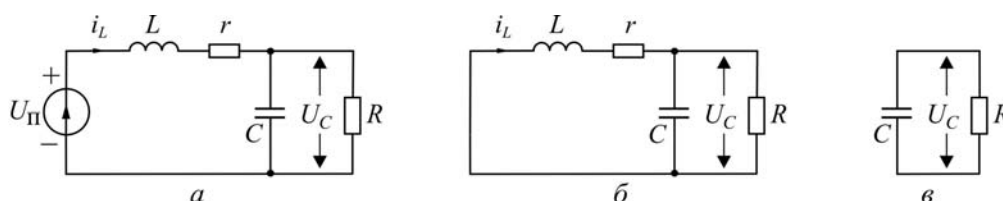


Рис. 2.7.2. Схемы замещения ИСН:

*a* – ключ замкнут; *б* – ключ разомкнут и  $i_L > 0$ ; *в* – ключ разомкнут и  $i_L = 0$

Схема замещения ИСН для интервалов времени, когда транзистор  $VT$  открыт, показана на рис. 2.7.2, *a*. Уравнения силовой части ИСН в переменных состоянии в этом случае имеют вид:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{r}{L}i_L - \frac{1}{L}U_C + \frac{1}{L}U_{\Pi}, \quad \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{U_C}{RC}. \quad (2.7.1)$$

Для интервалов времени, когда транзистор  $VT$  закрыт, схемы замещения представлены на рис. 2.7.2, *б* и *в* соответственно для  $i_L > 0$  и  $i_L = 0$ . При  $i_L > 0$  уравнения силовой части ИСН в переменных состоянии запишутся так:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{r}{L}i_L - \frac{1}{L}U_C, \quad \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{U_C}{RC}. \quad (2.7.2)$$

Если  $i_L = 0$ , то процесс в ИСН описывается уравнением

$$\frac{dU_C}{dt} = -\frac{U_C}{RC}.$$

Исключив из уравнений (2.7.1) и (2.7.2) ток дросселя  $i_L$ , можно получить уравнения «вход-выход» силовой части ИСН:

при открытом транзисторе

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + a_1 \frac{dU_C}{dt} + a_0 U_C = b_0 U_{\Pi}, \quad (2.7.3)$$

при закрытом транзисторе

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + a_1 \frac{dU_C}{dt} + a_0 U_C = 0. \quad (2.7.4)$$

Здесь

$$a_1 = \frac{L + RCr}{RLC}; \quad a_0 = \frac{R + r}{RLC}; \quad b_0 = \frac{1}{LC}.$$

Объединим уравнения (2.7.3) и (2.7.4), заменив входное напряжение в виде импульсов средним значением

$$\tilde{U}_{\Pi} = \gamma U_{\Pi}, \quad (2.7.5)$$

где  $\gamma$  – относительная длительность открытого состояния транзистора.

Получим

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + a_1 \frac{dU_C}{dt} + a_0 U_C = b_0 \tilde{U}_{\Pi}, \quad (2.7.6)$$

По уравнению (2.7.6) найдём передаточную функцию силовой части ИСН:

$$W_c(s) = \frac{U_C}{\tilde{U}_{\Pi}} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}.$$

На рис. 2.7.3, а изображена операторно-структурная схема модели силовой части ИСН с ШИМ. Схема содержит два нелинейных элемента. ШИМ, который преобразует напряжения управления  $U_y$  в относительную длительность  $\gamma$ , представлен звеном с насыщением, а уравнение (2.7.5) – элементом умножения.

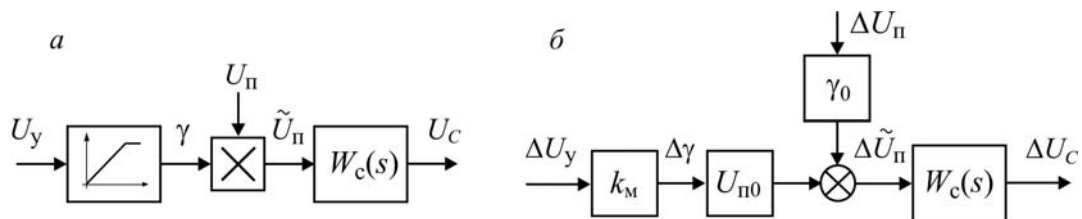


Рис. 2.7.3. Структура моделей ШИМ и силовой части ИСН:  
а – нелинейная модель; б – линеаризованная модель

Проведём линеаризацию нелинейных элементов. Для этого входные и выходные переменные нелинейных элементов запишем в приращениях относительно их значений в установившемся режиме:

$$\begin{aligned}\Delta U_y &= U_y - U_{y0}, & \Delta \gamma &= \gamma - \gamma_0, \\ \Delta U_\Pi &= U_\Pi - U_{\Pi 0}, & \Delta \tilde{U}_\Pi &= \tilde{U}_\Pi - \tilde{U}_{\Pi 0}.\end{aligned}$$

Линеаризованные уравнения ШИМ и элемента умножения имеют вид:

$$\begin{aligned}\Delta \gamma &= k_M \Delta U_y, \\ \Delta \tilde{U}_\Pi &= U_{\Pi 0} \cdot \Delta \gamma + \gamma_0 \cdot \Delta U_\Pi.\end{aligned}$$

Операторно-структурная схема линеаризованной модели силовой части ИСН с ШИМ представлена на рис. 2.7.3, б.

### 2.7.3. Синтез оптимальных по степени устойчивости параметров ПИ-регулятора

ПИ-регулятор описывается передаточной функцией

$$W_p(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_\Pi + \frac{k_I}{s} = \frac{k_\Pi s + k_I}{s},$$

где  $k_\Pi$ ,  $k_I$  – коэффициенты передачи соответственно для пропорциональной и интегральной составляющих входного сигнала.

Пусть передаточная функция объекта управления имеет вид

$$W_o(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}, \quad b_0 > 0, \quad a_1 > 0.$$

**Утверждение [4].** Оптимальные параметры ПИ-регулятора и оптимальная степень устойчивости определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}k_\Pi^* &= \frac{1}{b_0} \left( \mu^2 + \frac{a_1^2}{3} - a_0 \right), \\ k_I^* &= \frac{a_1}{3b_0} \left( \mu^2 + \frac{a_1^2}{9} \right), \\ \eta^* &= \frac{a_1}{3}.\end{aligned}\tag{2.7.7}$$

где  $\mu$  – свободный параметр, определяющий степень колебательности системы.

## 2.7.4. Выполнение лабораторной работы

### Методические указания

Операторно-структурная схема исследуемой непрерывной модели ИСН с ПИ-регулятором показана на рис. 2.7.4. В контур управления, кроме ПИ-регулятора, может быть введён дополнительный фильтр нижних частот с передаточной функцией  $W_{\phi}(s)$ . Исследование влияния этого фильтра на свойства ИСН предусмотрено программой лабораторной работы. Если особо не оговаривается, его передаточная функция

$$W_{\phi}(s) = \frac{1}{T_{\phi}s + 1}$$

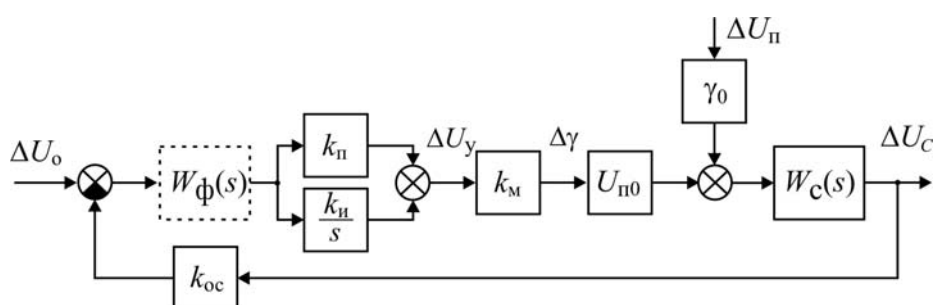


Рис. 2.7.4. Операторно-структурная схема непрерывной модели ИСН с ПИ-регулятором

Схема моделирования ИСН с ПИ-регулятором в среде MATLAB/Simulink изображена на рис. 2.7.5.

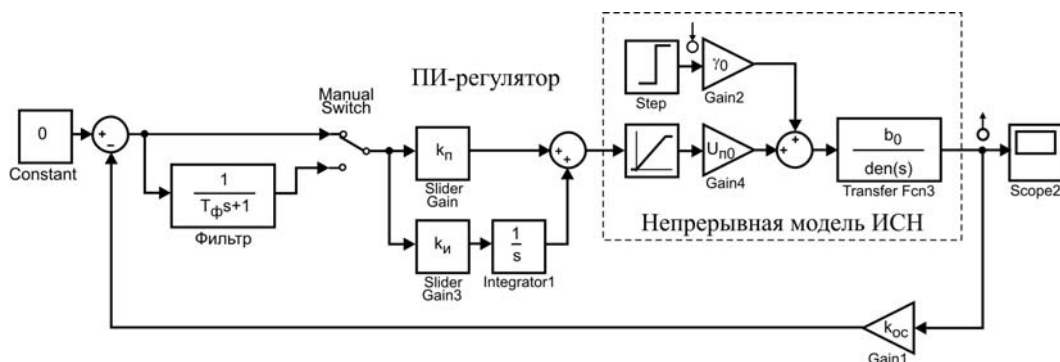


Рис. 2.7.5. Схема моделирования ИСН с ПИ-регулятором в среде MATLAB-Simulink

Для подключения дополнительного фильтра в схему моделирования введён ручной переключатель **Manual Switch**. Однако при желании для каждого варианта исследования можно создать и свою модель.

**Примечание.** Параметры силовой части ИСН, необходимые для выполнения лабораторной работы, задаются преподавателем.

## Программа

1. Составить в среде моделирования MATLAB/Simulink модель силовой части ИСН с заданными значениями параметров согласно схеме моделирования на рис. 2.7.5.

2. Пронаблюдать и зафиксировать нуль-полосную диаграмму, ЛАЧХ и ЛФЧХ силовой части ИСН.

3. Составить в среде моделирования MATLAB/Simulink модель ИСН с ПИ-регулятором (без фильтра) согласно схеме моделирования на рис. 2.7.5. Рассчитать и установить на модели значения параметров  $k_{\text{п}}^*$  и  $k_{\text{и}}^*$  ПИ-регулятора, при которых обеспечивается максимальное значение степени устойчивости.

4. При оптимальных значениях  $k_{\text{п}}^*$  и  $k_{\text{и}}^*$  параметров регулятора пронаблюдать и зафиксировать нуль-полосную диаграмму ИСН и кривую переходного процесса при ступенчатом приращении  $\Delta U_{\text{п}}$  напряжения питания. Определить степень устойчивости  $\eta$ . Сравните полученное значение со значением  $\eta^*$ , найденным по формуле (2.7.7).

5. Исследовать влияние отклонения параметров регулятора от их оптимальных значений  $k_{\text{п}}^*$  и  $k_{\text{и}}^*$  на степень устойчивости системы. Для этого, поочередно изменив параметры  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{и}}$  в сторону уменьшения и увеличения (примерно на 10–20%), по нуль-полосной диаграмме определить значения полюсов системы и степень устойчивости системы.

Одновременно пронаблюдать и зафиксировать кривые переходного процесса при ступенчатом приращении  $\Delta U_{\text{п}}$  напряжения питания.

6. Исследовать влияние дополнительного фильтра на степень устойчивости системы и качество переходных процессов при ступенчатом приращении  $\Delta U_{\text{п}}$  напряжения питания. Для этого установите оптимальные значения  $k_{\text{п}}^*$  и  $k_{\text{и}}^*$  параметров регулятора, с помощью переключателя **Manual Switch** подключите фильтр и меняйте его постоянную времени.

## Контрольные вопросы и задания

1. Поясните условия и правомерность применения непрерывной модели ИСН в усреднённых переменных.

2. Поясните процедуру линеаризации нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений.

3. С какой целью в контур управления ИСН вводится низкочастотный фильтр?