УДК 621.316.722.1

Зайцев Г. Ф., *д.т.н.*; **Лысенко Д. А.; Булгач Т. В.; Градобоева Н. В.,** *к.т.н.*
(Государственный университет информационно-коммуникационных технологий)

АНАЛОГОВЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ПРИНЦИПОМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ОТКЛОНЕНИЮ С АСТАТИЗМОМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. АНАЛІЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИЗАТОРА

Зайцев Г. Ф., Лисенко Д. О., Булгач Т. В., Градобоева Н.В. Аналоговий стабілізатор напруги з принципом керування по відхиленню з астатизмом першого порядку. Математична модель. Аналіз динамічних характеристик стабілізатора. Побудовано математичну модель аналогового стабілізатора напруги з принципом керування по відхиленню, астатизм першого порядку якого досягнуто завдяки включенню інтегруючого елемента в замкнутий контур системи. На підставі математичної моделі визначені передатні функції стабілізатора і виконано аналіз його динамічних характеристик (визначені напруги неузгодженості при зміні по різних законах відхилень вхідної напруги й опору навантаження).

Ключові слова: СТАБІЛІЗАТОР НАПРУГИ, АСТАТИЗМ, ПЕРЕДАТНЯ ФУНКЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИК

Зайцев Г. Ф., Лысенко Д. А., Булгач Т. В., Градобоева Н. В. Аналоговый стабилизатор напряжения с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка. Математическая модель. Анализ динамических характеристик стабилизатора. Построена математическая модель аналогового стабилизатора напряжения с принципом управления по отклонению, астатизм первого порядка которого достигнут благодаря включению интегрирующего элемента в замкнутый контур системы. На основании математической модели определены передаточные функции стабилизатора и выполнен анализ его динамических характеристик (определены напряжения рассогласования при изменении по различным законам отклонений входного напряжения и сопротивления нагрузки).

Ключевые слова: СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ, АСТАТИЗМ, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Zaitsev G. F., Lysenko D. O., Bulgach T. V., Gradoboieva N. V. Analogue voltage stabilizer with a principle controls a software to deviation with an astatism maiden about. Mathematical model. The analysis dynamic the characteristics of the deflocculant. The mathematical model of the analogue deflocculant of voltage with a principle of control on deviation is constructed, an astatism of the maiden order which one be reach due to actuation of an integrating member in a selfcontained contour of a system. Ground mathematical models are determined transfer functions of the deflocculant and the analysis of its dynamic characteristics is made (the voltage of misalignment are determined at change under the different laws of deviations of input voltage and resistance of load).

Key words: VOLTAGE STABILIZER, ASTATISM, TRANSFER FUNCTIONS, MATHEMATICAL MODEL, DYNAMIC CHARACTERISTICS

В данной статье построена математическая модель аналогового стабилизатора напряжения с принципом управления по отклонению, астатизм первого порядка которого достигнут благодаря включению интегрирующего элемента в замкнутый контур системы [1]. На основании математической модели определены передаточные функции стабилизатора и выполнен анализ его динамических характеристик (определены напряжения рассогласования при изменении по различным законам отклонений входного напряжения и сопротивления нагрузки).

1. Математическая модель. Математическая модель стабилизатора с принципом управления по отклонению с астатизмом первого порядка (рис. 1) отличается от математической модели статического стабилизатора [2, рис. 4,б] тем , что между усилителем У1 с коэффициентом усиления $k_У$ и моделью регулирующего элемента РЭ включено интегрирующее звено с передаточной функцией $k_И / p$.

Для упрощения анализа используем метод “замороженных” коэффициентов [3],

Согласно математической модели стабилизатора (рис.1) коэффициенты усиления устройств умножения УУ1 и УУ2 равны U_{BX} и они изменяются с изменением входного напряжения, т.е. стабилизатор является нестационарной системой автоматического управления, анализ которой представляет сложную задачу. Для упрощения анализа используем метод “замороженных” коэффициентов [3], приняв коэффициенты устройств умножения постоянными, равными $U_{ВХ\ Н}$.

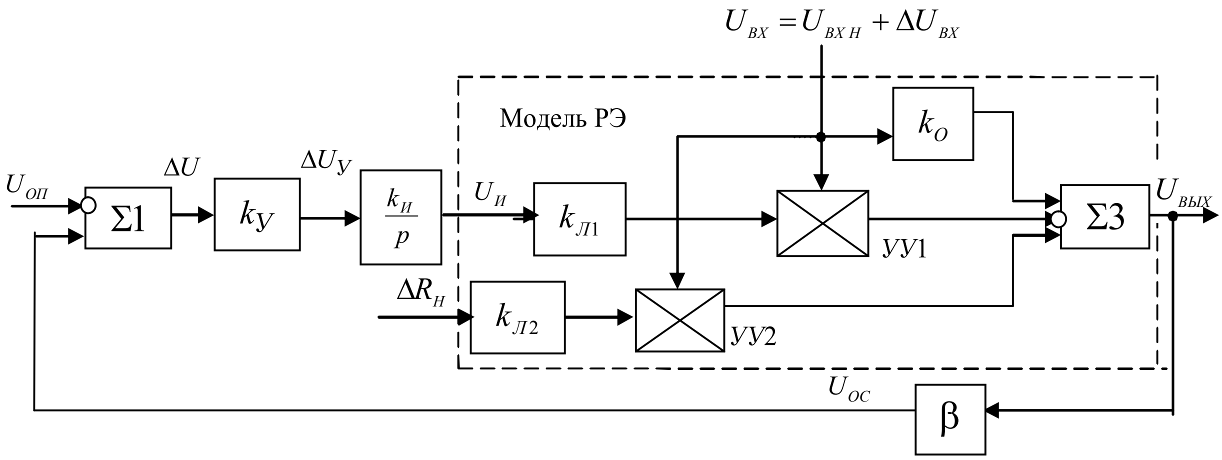

Рис. 1. Математическая модель аналогового стабилизатора напряжения

Согласно математической модели стабилизатор описывается следующей системой уравнений:

$$\Delta U(p) = U_{ОС}(p) - U_{ОП}(p); \qquad U_И(p) = \frac{k_У k_И}{p}\Delta U(p);$$

$$U_{ВЫХ}(p) = k_O U_{ВХ}(p) - k_{Л1} U_И(p) U_{ВХ\ Н} + k_{Л2}\Delta R_Н(p) U_{ВХ\ Н}.$$

$$U_{ОС}(p) = \beta \quad U_{ВЫХ}(p);$$

Исключая промежуточные переменные из системы уравнений, получаем:

$$\Delta U(p) = \beta \quad U_{ВЫХ}(p) - U_{ОП}(p) = \beta \quad k_O U_{ВХ}(p) - \beta \quad k_{Л1} U_И(p) U_{ВХ\ Н} +$$
$$+\beta \quad k_{Л2}\Delta R_Н(p) U_{ВХ\ Н} - U_{ОП}(p);$$

$$\Delta U(p) = \beta k_O U_{ВХ}(p) - \frac{\beta k_{Л1} k_У k_И}{p} U_{ВХ\ Н} \times \Delta U(p) + \beta \quad k_{Л2} U_{ВХ\ Н} \cdot \Delta R_Н(p) - U_{ОП}(p);$$

$$\left[1 + \frac{\beta k_{Л1} k_У k_И U_{ВХ\,Н}}{p}\right] \Delta U(p) = \beta k_O U_{ВХ}(p) + \beta k_{Л2} U_{ВХ\,Н} \Delta R_Н(p) - U_{ОП}(p) p;$$

$$\left[p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{ВХ\ Н}\right] \Delta U(p) = \beta k_O U_{ВХ}(p) p + \beta k_{Л2}\Delta R_Н(p) U_{ВХ\,Н}\, p - U_{ОП}(p) p.$$

Откуда

$$\Delta U(p) = \frac{\beta k_O U_{ВХ}(p) \ p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{ВХ\,Н}} + \frac{\beta k_{Л2} U_{ВХ\,Н} \Delta R_Н(p) p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{ВХ\,Н}} - \frac{U_{ОП}(p) \ p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{ВХ\,Н}}. \qquad (1)$$

Принимая во внимание, что $U_{ВХ}(p) = U_{ВХ\,Н}(p) + \Delta U_{ВХ}(p)$, $U_{ВЫХ\,Н}(p) = k_O U_{ВХ\,Н}(p)$, $U_{ОП}(p) = \beta \quad U_{ВЫХ\,Н}(p)$, получим:

$$\Delta U(p)=\frac{\beta k_O U_{BX\,H}(p)p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}+\frac{\beta k_O \Delta U_{BX}(p)p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}+\frac{\beta k_{Л2} U_{BX\,H}\Delta R_H(p)p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}-\frac{\beta k_O U_{BX\,H}(p)p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}},$$

или
$$\Delta U(p)=\frac{\beta k_O \Delta U_{BX}(p)p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}+\frac{\beta k_{Л2} U_{BX\,H}\, p\Delta R_H(p)}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}=\Delta U_U(p)+\Delta U_R(p),$$

где $\Delta U_U(p)$ – составляющая напряжения рассогласования, вызываемая отклонением ΔU_{BX} входного напряжения; $\Delta U_R(p)$ – составляющая напряжение рассогласования, вызываемая отклонением ΔR_H сопротивления нагрузки; при этом

$$\Delta U_U(p)=\frac{\beta\ \ k_O p}{p+\beta\ \ k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}\Delta U_{BX}(p),\qquad(2)$$

$$\Delta U_R(p)=\frac{\beta\ \ k_{Л2}U_{BX\,H}\,p}{p+\beta\ \ k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}\Delta R_H(p).\qquad(3)$$

В соответствии с (2) и (3) передаточные функции, связывающие составляющие напряжения рассогласования $\Delta U_U(p)$ и $\Delta U_R(p)$ с отклонениями $\Delta U_{BX}(p)$ соответственно имеют вид

$$K_{\Delta U,U}(p)=\frac{\Delta U_U(p)}{\Delta U_{BX}(p)}=\frac{\beta k_O p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}},\qquad(4)$$

$$K_{\Delta U,R}(p)=\frac{\Delta U_R(p)}{\Delta R_H(p)}=\frac{\beta\ \ k_{Л2}U_{BX\,H}\,p}{p+\beta\ \ k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}.\qquad(5)$$

Согласно формулам (4) и (5) стабилизатор с интегрирующим элементом (рис.1) является астатической системой с астатизмом первого порядка как по отношению к ΔU_{BX}, так и по отношению к ΔR_H.

2. Расчет напряжений рассогласования, вызываемых ΔU_{BX}. Установившееся напряжение рассогласования стабилизатора ΔU_U в соответствии с теоремой операционного исчисления определяется выражением [4]:

$$\Delta U_U=\lim_{p\to 0}p\cdot\Delta U_U(p).\qquad(6)$$

Подставив в (6) значение ΔU_U из (4), получим:

$$\Delta U_U=\lim_{p\to 0}pK_{\Delta U,U}(p)\cdot\Delta U_{BX}(p).\qquad(7)$$

При изменении отклонения входного напряжения по ступенчатому закону $\Delta U_{BX}=\Delta U_{BX\,0}$ напряжение рассогласования в установившемся режиме получим, если в формулу (6) подставим значение изображения возмущающего воздействия $\Delta U_{BX}(p)=L\{\Delta U_{BX\,0}\}=\Delta U_{BX\,0}/p$ и значение передаточной функции стабилизатора из (4)

$$\Delta U_U=\lim_{p\to 0}p\frac{\beta\ k_0 p}{p+\beta k_{Л1}k_У k_И U_{BX\,H}}\frac{\Delta U_{BX\,0}}{p}=0,\qquad(8)$$

т.е. напряжение рассогласования стабилизатора с интегрирующим элементом при ступенчатом изменении ΔU_{BX} равно нулю. Напомним, что в статическом стабилизаторе при этом возникает напряжение рассогласования, пропорциональное $\Delta U_{BX\,0}$ [5, (8)].

Если ΔU_{BX} изменяется по линейному закону $\Delta U_{BX} = \alpha_1 t$, то динамическую ошибку (напряжение рассогласования) стабилизатора получим, подставив в (7) изображение возмущающего воздействия $\Delta U_{BX}(p) = L\{\alpha_1 t\} = \alpha_1 / p^2$:

$$\Delta U_U = \lim_{p\to 0} p \frac{\beta\ k_0 p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{BX\,H}} \cdot \frac{\alpha_1}{p^2} = \frac{\beta\ k_0}{k_{Л1} k_У k_И U_{BX\,H}} \alpha_1, \tag{9}$$

т.е. при линейном изменении отклонения входного напряжения ошибка системы не возрастает во времени, стремясь к бесконечности [5, (9)], как в традиционном статическом стабилизаторе, а ограничено по значению.

Если ΔU_{BX} изменяется по квадратичному закону $\Delta U_{BX} = \alpha_2 t^2$, изображение которого $\Delta U_{BX}(p) = L\{\alpha_2 t^2\} = 2!\alpha_2 / p^3$, то напряжение рассогласования и в стабилизаторе с интегрирующим элементом возрастает во времени, стремясь к бесконечности:

$$\Delta U_U = \lim_{p\to 0} p \frac{\beta\ k_0 p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{BX\,H}} 2! \frac{\alpha_2}{p^3} \to \infty. \tag{10}$$

3. Расчет напряжений рассогласования стабилизатора, вызываемых ΔR_H. Установившееся напряжение рассогласования стабилизатора ΔU_R в соответствии с теоремой операционного исчисления определяется выражением:

$$\Delta U_R = \lim_{p\to 0} p \cdot \Delta U_R(p). \tag{11}$$

Подставив в (11) значение ΔU_R из (5), получим

$$\Delta U_R = \lim_{p\to 0} p K_{\Delta U,R}(p) \cdot \Delta R_H(p). \tag{12}$$

При изменении отклонения сопротивления нагрузки по ступенчатому закону $\Delta R_H = \Delta R_{H\,0}$ напряжение рассогласования в установившемся режиме получим, если в формулу (12) подставим значение изображения возмущающего воздействия $\Delta R_H(p) = L\{\Delta R_{H\,0}\} = \Delta R_{R\,0} / p$ и значение передаточной функции стабилизатора из (5)

$$\Delta U_R = \lim_{p\to 0} p \frac{\beta\ k_{Л2} U_{BX\,H} p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{BX\,H}} \cdot \frac{\Delta R_{H\,0}}{p} = 0, \tag{13}$$

т.е. напряжение рассогласования стабилизатора с интегрирующим элементом при ступенчатом изменении ΔR_H равно нулю. В традиционном статическом стабилизаторе при этом возникает напряжение рассогласования, пропорциональное $\Delta R_{H\,0}$ см [5, (11)].

Если ΔR_H изменяется по линейному закону $\Delta R_H = \alpha_1 t$, то напряжение рассогласования стабилизатора получим, подставив в (12) изображение возмущающего воздействия:

$$\Delta U_R = \lim_{p\to 0} p \frac{\beta\ k_{Л2} U_{BX\,H} p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{BX\,H}} \cdot \frac{\alpha_1}{p^2} = \frac{k_{Л2}}{k_{Л1} k_У k_И} \alpha_1, \tag{14}$$

т.е. при линейном изменении отклонения входного напряжения ошибка системы не возрастает во времени, стремясь к бесконечности [5, (12)], как в традиционном статическом стабилизаторе, а ограничено по значению.

Если ΔR_H изменяется по квадратичному закону $\Delta R_H = \alpha_2 t^2$, изображение которого $\Delta R_H(p) = L\{\alpha_2 t^2\} = 2!\alpha_2 / p^3$, то напряжение рассогласования и в стабилизаторе с интегрирующим элементом возрастает во времени, стремясь к бесконечности:

$$\Delta U_U = \lim_{p\to 0} p \frac{\beta\ k_{Л2} U_{ВХ\,Н} p}{p + \beta k_{Л1} k_У k_И U_{ВХ\,Н}} 2! \frac{\alpha_2}{p^3} = \to \infty . \qquad (15)$$

Как отмечалось, стабилизатор напряжения является нестационарной системой автоматического управления. Для упрощения анализа динамических характеристик стабилизатора согласно методу “замороженных” коэффициентов, коэффициенты устройств умножения УУ1 и УУ2 математической модели регулирующего элемента РЭ (рис. 1), равные $U_{ВХ}$, приняты постоянными. Естественно при этом будут возникать определенные погрешности в расчетах напряжений рассогласования. Однако, как следует из анализа математической модели и рассмотрения физических процессов, свойства стабилизатора, как системы автоматического управления, обладающего астатизмом первого порядка , сохраняются: при ступенчатых изменениях $\Delta U_{ВХ}$ и ΔR_H напряжения рассогласования, свойственные традиционным статическим стабилизаторам, устраняются; при изменениях $\Delta U_{ВХ}$ и ΔR_H по линейному закону возрастающие напряжения рассогласования в традиционных стабилизаторах, ограничиваются конечными значениями.

Таким образом, в тех случаях, когда к точности стабилизаторов напряжения предъявляются не слишком жесткие требования, вместо стабилизаторов с принципом комбинированного управления можно использовать стабилизаторы с принципом управления по отклонению, в замкнутый контур которых включен интегрирующий элемент. При включении последнего статический стабилизатор преобразуется в астатический с астатизмом первого порядка относительно возмущающих воздействий. При этом устраняются свойственные традиционным статическим стабилизаторам постоянные по значению напряжения рассогласования, вызываемые ступенчатыми изменениями отклонений входного напряжения и сопротивления нагрузки, а возрастающие напряжения рассогласования пи изменении возмущающих воздействий по линейному закону ограничиваются по значению.

Литература

1. Астатический стабилизатор напряжения непрерывного действия / [Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Ю. В. Каргаполов, Н. В. Градобоева] // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2010. – Т. 8, №4. – С. 225-231.

2. Зайцев Г. Ф. Математическая модель компенсационного стабилизатора напряжения с принципом управления по отклонению / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Ю. В. Каргаполов // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2009. –Т. 7, №2. – С.136-144.

3. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М.:, 1966. – 992 с.

4. Радиоавтоматика. Т.1. / [Г. Ф. Зайцев, Г. Н. Арсеньев, В. Г. Кривуца, В. Л. Булгач]. – К.: ДУІКТ, ООО «Д.В.К.», 2004. – 524 с.

5. Зайцев Г. Ф. Анализ математической модели компенсационного стабилизатора напряжения / Г. Ф. Зайцев, В. Л. Булгач, Ю. В. Каргаполов // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2009. – Том 7, №1. С. 50-54.