

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАЦИЕЙ ТОКА В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

AUTOMATIC CURRENT CONTROL SYSTEM IN INSTALLATIONS FOR MEASURING SOIL RESISTIVITY

A. Martynov

Summary. In this article, we consider the possibility of applying various options for automatic control and stabilization of the current signal in vertical electrical sounding devices used in soil resistivity measurements. The circuits should provide a smooth transition of the current after the unit is turned on to the preset level and the noise suppression associated with the physical characteristics of the medium to be measured is suppressed. The circuit must meet the specified requirements, among which zero static error in steady state, system stability, current stability under external disturbances, and others. The possibility and efficiency of application of PID regulators and other types, as well as their combinations, are analyzed. The analysis is performed using mathematical modeling software. Algorithms for evaluating the characteristics of circuits and checking them for compliance with specified requirements are described. Such characteristics as time of the transient process, noise suppression, stability of the system under external disturbances, static error in the steady state are estimated. The selection of parameters for the regulators of the circuits is carried out. The recommendations for speeding up the selection process are given. The stability of schemes with matched parameters is estimated. A comparative analysis of the final results is presented with the choice of schemes with the best results.

Keywords: ground specific resistance; Method of vertical electrical exploration; automatic control system; PID-regulator; modeling.

Мартынов Алексей Владимирович

Ведущий инженер, Компания «ТБН энергосервис»
martal12345.67@mail.ru

Аннотация: В данной статье рассматриваются возможность применения различных вариантов схем автоматического регулирования и стабилизации токового сигнала в установках вертикального электрического зондирования, применяемых в установках измерения удельного сопротивления грунта. Схемы должны обеспечивать плавный переход тока после включения установки на заданный уровень и подавление шумов, связанных с физическими особенностями измеряемой среды. Схема должна соответствовать заданным требованиям, среди которых нулевая статическая ошибка в установившемся режиме, устойчивость системы, стабильность тока при внешних возмущениях и другие. Анализируется возможность и эффективность применения в схемах регуляторов ПИД и других типов, а также их комбинаций. Анализ выполняется с применением программных средств математического моделирования. Описываются алгоритмы оценки характеристик схем и проверки их на соответствие заданным требованиям. Оцениваются такие характеристики как время переходного процесса, подавление шума, стабильность системы при внешних возмущениях, статическая ошибка в установившемся режиме. Осуществляется подбор параметров для регуляторов схем. Приведены рекомендации для ускорения процесса подбора. Проведена оценка устойчивости схем с подобранными параметрами. Приводится сравнительный анализ итоговых результатов с выбором схем с наилучшими результатами.

Ключевые слова: удельное сопротивление грунта; Метод вертикального электрического зондирования; система автоматического регулирования; ПИД-регулятор; моделирование.

Введение

Для измерения удельного сопротивления грунта применяются различные методы, в т.ч. метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [1,2,3,4].

В процессе измерения удельного грунта в установках ВЭЗ в землю, при помощи двух точечных питающих электродов от электрического измерительного генератора, вводится стабилизированный электрический ток I . Значение тока необходимо регулировать, обеспечивая плавный переход на заданный рабочий уровень при запуске, а также подавлять шумы и другие внешние возмущения, связанные с физическими особенностями измеряемой среды.

В данной работе рассматривается реализация различных схем автоматического регулирования тока, анализируются их эффективность и целесообразность применения.

1. Постановка задачи

Системы автоматического регулирования токового сигнала должны выполнять следующие задачи:

Задача 1. Обеспечить выход значения регулируемого параметра на заданный уровень по апериодическому [6,7] закону.

Задача 2. Обеспечить подавление шумов и других внешних возмущений, поступающих извне (от электродов) на вход данного устройства.

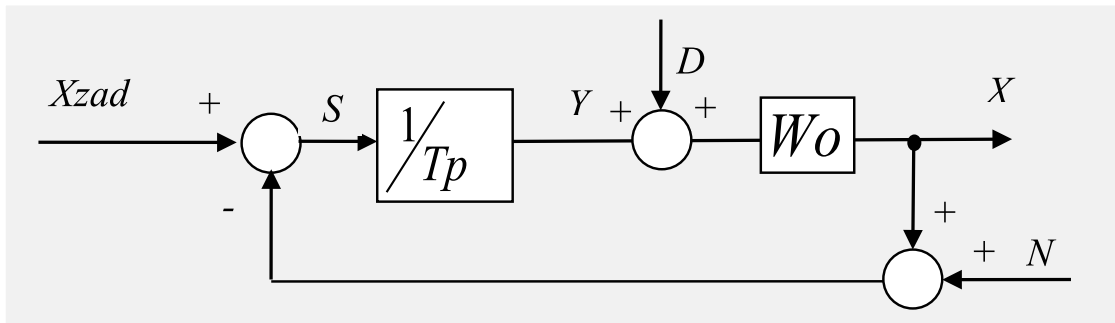


Рис. 1. Структурная схема автоматического регулирования на основе аperiodического звена 1-го порядка

2. Выбор схемы автоматического регулирования

Для решения задачи 1 необходимо подобрать схему, которая отвечает следующим требованиям:

- ◆ Нулевая статическая ошибка в установившемся режиме;
- ◆ быстрый и плавный переходной процесс;
- ◆ обеспечение устойчивости;

Для решения задачи 2 схема должна обеспечивать:

- ◆ подавление шумов;
- ◆ стабильность уровня выходного сигнала при внешних возмущениях, т.е. способность восстановления значения регулируемого параметра до заданного уровня.

2.1. Схема на основе аperiodического звена

Аperiodическое звено 1-го порядка [6,7] обеспечивает плавный переходной процесс.

Передаточная функция звена в операторном виде при нулевых начальных условиях имеет вид:

$$W = \frac{1}{Tp + 1}, \tag{1}$$

где T — постоянная времени.

Не сложно проверить, что передаточная функция аperiodического звена равна передаточной функции интегратора с передаточной функцией

$$\frac{1}{Tp'}$$

охваченного единичной отрицательной обратной связью.

Схема на основе аperiodического звена приведена на рисунке 1.

Задающий сигнал $Xzad$ представляет собой ступенчатую функцию со скачком от 0 до заданного значения.

Внешние возмущения D связаны с влиянием нагрузки и другими параметрами измеряемой среды. Для упрощения анализа D моделируется сосредоточенным источником, приложенным к входу объекта.

Источник шума N моделирует помехи измерений регулируемого параметра X и помех в цепи обратной связи.

Объект регулирования представляет собой измеряемую среду и электроды, т.е. вход и выход объекта совпадают. Регулируемый параметр X при отсутствии внешних возмущений равен управляющему сигналу Y , влияние внешних возмущений учтено в схеме, поэтому последующих схемах звено Wo исключено.

2.2. Схемы с регуляторами

Для улучшения качества управления (регулирования) в схему добавляются регуляторы, которые могут представлять собой пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы [6,7], либо другие более сложные регуляторы.

На рисунке 2 приведена схема автоматического регулирования с регулятором, обозначенным R .

Регулируемый параметр X рассчитывается по формуле:

$$X = \frac{R}{Tp + R} Xzad + \frac{Tp}{Tp + R} D - \frac{R}{Tp + R} N \tag{2}$$

Учитывая принцип суперпозиции [6,7], в формуле (2) видно, что передаточные функции полезного сигнала и шума совпадают по модулю, соответственно имеют

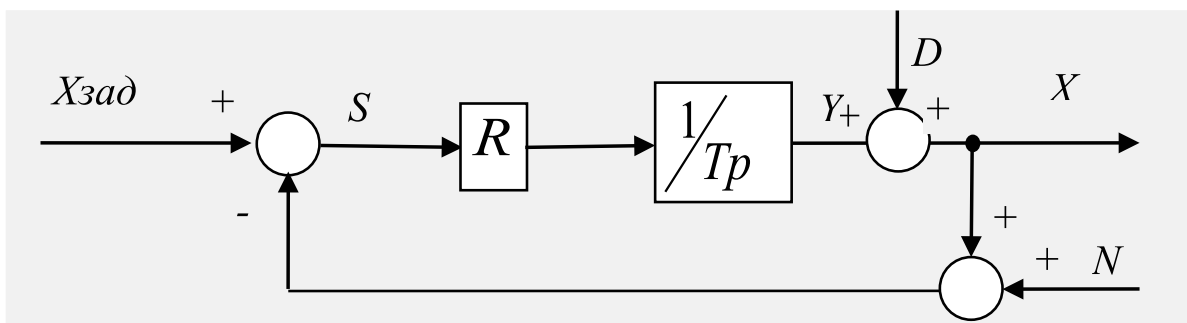


Рис. 2. Структурная схема автоматического регулирования с регулятором

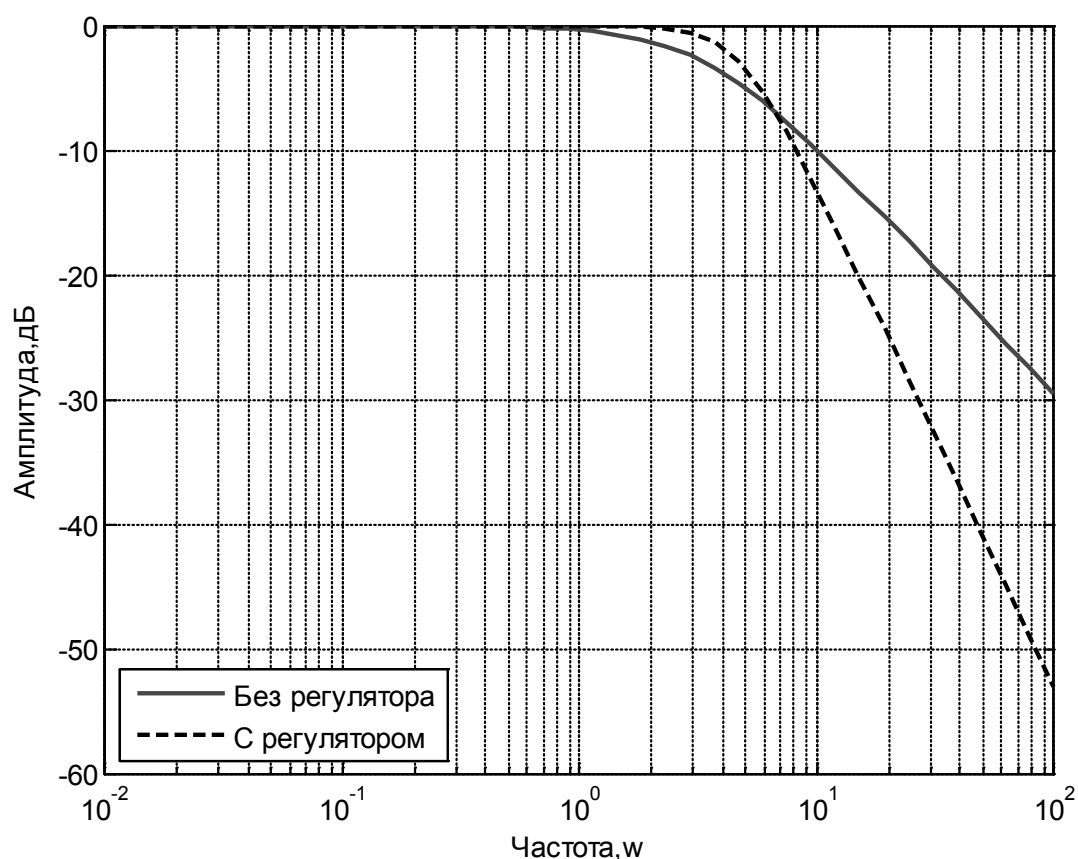


Рис. 3. ЛАЧХ схем без регулятора с регулятором типа апериодического звена 1-го порядка.

общую логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ).

ЛАЧХ должна быть близкой к нулю в области низких частот, чтобы обеспечить нулевую статическую ошибку и резко идти вниз в области высоких частот для подавления шума.

ПИД- регуляторы, можно представить в операторном виде как звено с передаточной функцией:

$$R = K1 + K2p + \frac{K3}{p}, \quad (3)$$

где $K1, K2, K3$ — подбираемые параметры.

Интерес также представляет регулятор в виде апериодического звена 1-го порядка (далее по тексту А) с передаточной функцией:

$$A = \frac{1}{T2p + 1}, \quad (4)$$

где $T2$ — подбираемый параметр.

На рисунке 3 приведены две диаграммы ЛАЧХ для схемы на основе апериодического звена 1-го порядка и с регулятором А при $T2 = 0,15$.

Таблица 1. Передаточные функции регуляторов и схем на их основе

№ п/п	Тип	ПФ регулятора	ПФ схемы
1	П	$K1$	$Y = \frac{K1}{Tp + K1} X_{zad}$
2	Д	$K2p$	$Y = \frac{K2}{T + K2} X_{zad}$
3	И	$\frac{K3}{p}$	$Y = \frac{K3}{Tp^2 + K3} X_{zad}$
4	ПД	$K1 + K2p$	$Y = \frac{K2p + K1}{(T + K2)p + K1} X_{zad}$
5	ПИ	$K1 + \frac{K3}{p}$	$Y = \frac{K1p + K3}{Tp^2 + K1p + K3} X_{zad}$
6	ДИ	$Wpid = K2p + \frac{K3}{p}$	$Y = \frac{K2p^2 + K3}{(T + K2)p^2 + K3} X_{zad}$
7	ПИД	$K1 + K2p + \frac{K3}{p}$	$Y = \frac{K2p^2 + K1p + K3}{(T + K2)p^2 + K1p + K3} X_{zad}$
8	А+П	$\frac{K1}{T2p^2 + 1}$	$Y = \frac{K1}{T \cdot T2p^2 + Tp + K1} X_{zad}$
9	А+Д	$\frac{K2p}{T2p + 1}$	$Y = \frac{K2}{T \cdot T2p + T + K2} X_{zad}$
10	А+И	$\frac{K3}{T2p^2 + p}$	$Y = \frac{K3}{T \cdot T2p^3 + Tp^2 + K3} X_{zad}$
11	А+ПД	$\frac{K1 + K2p}{T2p + 1}$	$Y = \frac{K2p + K1}{T \cdot T2p^2 + (T + K2)p + K1} X_{zad}$
12	А+ПИ	$\frac{K1p + K3}{T2p^2 + p}$	$Y = \frac{K1p + K3}{T \cdot T2p^3 + Tp^2 + K1p + K3} X_{zad}$
13	А+ДИ	$\frac{K2p^2 + K3}{T2p^2 + p}$	$Y = \frac{K2p^2 + K3}{T \cdot T2p^3 + (T + K2)p^2 + K3} X_{zad}$
14	А+ПИД	$\frac{K1p^2 + K1pK3}{T2p^2 + p}$	$Y = \frac{K2p^2 + K1p + K3}{T \cdot T2p^3 + (T + K2)p^2 + K1p + K3} X_{zad}$

По диаграммам видно, что ЛАЧХ для схемы с регулятором А более резко идёт вниз, т.е. более эффективно подавляется шум.

В таблице 1 приведены типы регуляторов и передаточные функции (ПФ) регуляторов и схем на их основе.

Схемы с регуляторами Д, И, ДИ, А+Д, А+И, А+ДИ не подходят для решения поставленных задач, и в дальнейшем не рассматриваются.

Остальные схемы подробно рассматриваются в разделе «Анализ и моделирование».

3. Анализ и моделирование

Подбор значений параметров $T2, K1, K2, K3$ для обеспечения наиболее качественного регулирования выполняется с помощью математического моделирования [14,15].

В разработанной математической модели на вход подается ступенчатая функция со скачком от 0 до 1,5 в момент включения. На выходе формируются дискретные значения функции регулируемого параметра X . Дискретность моделирования 0,01 сек; значение постоянной времени T при расчёте равно 0,3 сек; общее время моделирования 10 сек.

По выбору, в зависимости от задачи, можно включать или не включать шумовое воздействие N в виде нормального шума, внешние возмущения D (рисунки 1,2).

3.1. Оценка статической ошибки

Входной сигнал X_{zad} в установившемся режиме является постоянным, т.е. предельный случай гармонического (синуса) с нулевой частотой. Поэтому для обеспечения нулевой установившейся ошибки прямая цепь «регулятор R — интегрирующее звено

$$\frac{1}{Tp} \gg$$

должна иметь бесконечное усиление на нулевой частоте ($p \rightarrow 0$) [6,7].

В рассматриваемых далее схемах данное условие выполняется.

Для оценки статической ошибки рассчитывается среднее значение \bar{X} функции X за последние 5 секунд периода моделирования, и определяется статическая ошибка по формуле:

$$\Delta = X_{zad} - \bar{X} \quad (6)$$

3.2. Оценка времени переходного процесса по результатам моделирования

Время переходного процесса определяется периодом с момента скачка сигнала X_{zad} до момента, когда

значение регулируемого параметра на выходе схемы достигает стабильного состояния.

Для оценки времени переходного процесса моделируется функция регулируемого параметра X без шума и внешних возмущений. Для каждого дискретного значения функции, начиная с предпоследнего в сторону убывания, определяется относительное отклонение его от последнего дискретного значения. Процесс продолжается до момента на оси времени, когда относительное отклонение превысит заданный порог Δ (см. далее). Этот определяет время переходного процесса.

Для схемы на основе аperiodического звена без регулятора, примерное время переходного процесса можно рассчитать по формуле:

$$Tp = 3 \cdot T \quad (7)$$

При $T = 0,3$ сек. данное $Tp = 0,9$ сек.

В модели данный результат получается при $\Delta = 3\%$.

Рассматриваемые схемы могут представлять собой аperiodические звенья 2-го порядка или более сложные схемы, в которых присутствует «колебательность». Т.е. достижение коридора 3% не обеспечивает достаточной точности, необходимой для измерения в установке ВЭЗ.

В модели устанавливается порог Δ равный 1%. Тогда по результату моделирования схемы на основе аperiodического звена без регулятора время переходного процесса получается равным 1,23 секунды.

Как показывают исследования, при стремлении уменьшить время переходного процесса за счёт подбора параметров $T2, K1, K2, K3$, ухудшается характеристика подавления шума. Т.к. более приоритетной задачей в рамках данной работы является подавления шума, при подборе параметров $T2, K1, K2, K3$ допустимое время переходного процесса увеличено до 1,5 сек.

3.3. Оценка подавления шумов по результатам моделирования

Для оценки подавления шумов моделируется функция регулируемого параметра X с подмешиванием нормального шума N со среднеквадратичным отклонением 0,15.

Чтобы оценить степень подавления шума рассматриваемыми схемами, в модели выполняется расчет стандартного отклонения по формуле:

$$Sr = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (8)$$

где

S — среднеквадратичное отклонение.

Для расчёта дисперсии выходного сигнала X рассматривается интервал времени от 5 до 10 секунд, когда выходной сигнал гарантированно стабилизирован.

Величина стандартного отклонения Sr для схемы на основе апериодического звена без регулятора по результатам моделирования равна 0,011546. В других схемах, более сложных в реализации, данная величина должна быть ниже. При подборе параметров учитывается данное условие.

3.4. Оценка стабильности системы при возмущениях по результатам моделирования

Внешние возмущения, связанные с влиянием нагрузки и других параметров измеряемой среды, влияют на функционирование системы, выводя её на время из рабочего состояния. Способность быстрого возвращения в исходное состояние определяет качество стабильности системы.

После скачка, вызванного внешним возмущением, значение параметра X постепенно достигает уровня, близкого $X_{зад}$, т.е. уровня сигнала без внешнего возмущения. Чем меньше время достижения данного уровня, тем лучше стабильность системы.

Для оценки стабильности системы при внешних возмущениях вначале моделируется функция регулируемого параметра X без шума и без возмущающих возмущений. Затем моделируется аналогичная функция с внешним возмущением, представляющим собой отрицательный скачок на 5%, подмешиваемый к сигналу Y (рисунки 1,2).

Далее выполняется сравнение функций, и определяется период времени Ts , в течение которого их значения различаются на величину более 0,2% уровня $X_{зад}$. Значение Ts определяет стабильность системы.

Для схемы на основе апериодического звена без регулятора по результатам моделирования Ts равно 0,95 сек. Незначительное превышение данной величины при подборе параметров $T2, K1, K2, K3$ не должно принципиально сказаться на стабильности системы, позволяя при этом улучшить подавление шума, поэтому допустимое значение Ts увеличено до 1 сек.

3.5. Подбор параметров по результатам моделирования

Критерием подбора является максимальное подавление шума (т.е. минимальное значение Sr) при соблюдении условий:

- ◆ Время переходного процесса Tp не должно превышать 1,5 секунды.
- ◆ Среднее отклонение Sr не должно превышать 0,011546.
- ◆ Значение Ts не должно превышать 1 секунды.

Подбор параметров осуществляется с помощью программной обработки, при которой многократно выполняется математическое моделирование схем с последующей обработкой результатов при различных заданных комбинациях параметров $T2, K1, K2, K3$. В программе задаются начальное значение, шаг и количество значений $T2, K1, K2, K3$.

Для упрощённых регуляторов ПИ, ПД, П и др., начальные значения отсутствующих параметров задаются равными 0, количество значений 1.

Если $NK1, NK2, NK3, NT2$ — количество значений параметров $T2, K1, K2, K3$ соответственно, то количество комбинаций равно:

$$NK = NK1 * NK2 * NK3 * NT2 \quad (9)$$

Данное число может быть достаточно большим и значительно увеличивает время подбора параметров. Для ускорения процесса целесообразно:

- ◆ При первом запуске программы задать более крупный шаг, что обеспечивает просмотр заданного диапазона при меньшем количестве значений.
- ◆ При последующих запусках программы анализировать предыдущие результаты и исключать неподходящие области значений параметров, таким образом, сужая диапазон и уменьшая шаг.

В таблице 2 приведены результаты подбора параметров $T2, K1, K2, K3$ и обеспечиваемое ими среднее отклонение Sr с помощью описанной выше программной обработки.

В схемах с регуляторами ПД, ПИД дифференциальная составляющая улучшений по подавлению шума не даёт и далее не рассматривается

3.6. Оценка устойчивости

В данном разделе проводится оценку устойчивости рассматриваемых схем с подобранными параметрами.

Таблица 2. Результаты подбора параметров

№ п/п	Тип	Параметры				Sr	Примечание
		K1	K2	K3	T2		
1	П	1	-	-	-	0,0115460	Без регулятора
2	П	0,96	-	-	-	0,0112110	
3	ПД	0,96	0	-	-	0,0112110	
4	ПИ	0,85	-	0,0570	-	0,0104990	
5	ПИД	0,85	0	0,0570	-	0,0104990	
6	А+П	0,66	-	-	0,1822	0,0078528	
7	А+ПД	0,70	0,0390	-	0,2180	0,0076077	
8	А+ПИ	0,65	-	0,0080	0,1840	0,0077707	
9	А+ПИД	0,67	0,0174	0,0076	0,1998	0,0076052	

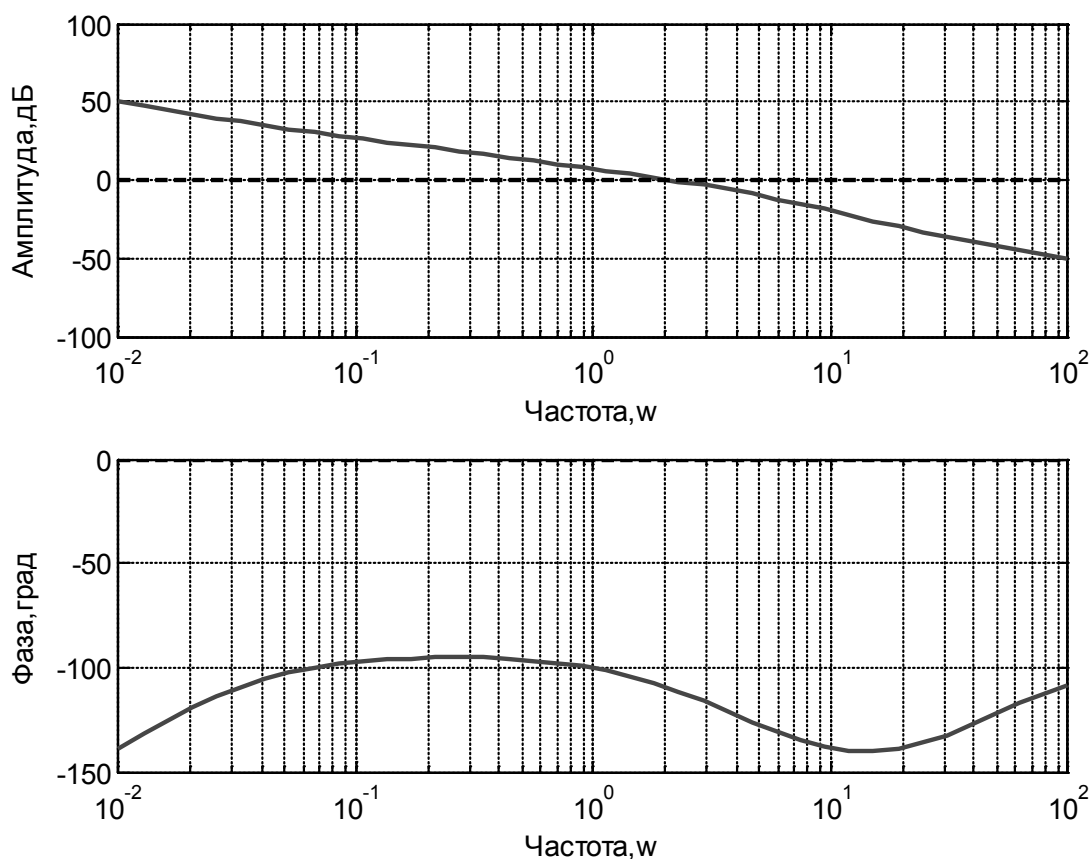


Рис. 6. ЛАФЧХ схемы с регулятором типа А+ПИД

Оценку устойчивости системы можно выполнить, применив критерий Найквиста для ЛАФЧХ [6,7,9]. Для этого необходимо построить и проанализировать ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы без шума и внешних возмущений. Система считается устойчивой, если значение фазы на частоте среза должно быть больше, чем -180° .

На рисунке 6 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы схемы с регулятором типа А + ПИД, как наиболее сложной.

По рисунку видно, что схема с регулятором типа А+ПИД соответствует критерию устойчивости Найквиста для ЛАФЧХ. Остальные схемы также соответствуют данному критерию. Их ЛАФЧХ здесь не приводятся.

3.7. Итоговые результаты

В таблице 3 приведены результаты математического моделирования схем с подобранными параметрами.

Таблица 3. Результаты математического моделирования

№ п/п	Тип	Параметры				Результаты моделирования			
		K1	K2	K3	T2	Sr	Tr	Ts	Δ
1	П	1	-	-	-	0,0115460	1,23	0,95	-3.8*10 ⁻⁹
2	П	0,96	-	-	-	0,0112110	1,29	0,99	-7.8*10 ⁻⁹
3	ПИ	0,85	-	0,0570	-	0,0104990	1,31	0,99	0,023
4	А+П	0,66	-	-	0,1822	0,0078528	1,08	0,99	6,7*10 ⁻⁸
5	А+ПД	0,70	0,039	-	0,2180	0,0076077	1,09	0,99	1,9*10 ⁻⁷
6	А+ПИ	0,65	-	0,0080	0,1840	0,0077707	1,10	0,99	0,008
7	А+ПИД	0,67	0,0174	0,0076	0,1998	0,0076052	1,10	0,99	0,007

Для сравнения в первой строке таблицы приведены результаты схемы на основе апериодического звена.

Выводы по результатам моделирования

1. Наилучший результат по подавлению шума обеспечивают схемы с регулятором типа А+ПД и. А+ПИД.
2. Интегральная составляющая в регуляторе увеличивает значение статической ошибки Δ, и в схеме с регулятором типа А+ПИД составляет 0,48% относительно полезного сигнала.
3. В схемах с составными регуляторами время переходного процесса меньше.

Заключение

Применение ПИД-регуляторов в схеме автоматического управления генерацией тока обеспечивает некоторые улучшения функционирования в плане подавления шумов, стабилизации при внешних воздействиях.

Лучшего эффекта можно достичь, применяя более сложные составные регуляторы. В данной работе рассматривались ПИД-регуляторы с дополнительным апериодическим звеном 1-го порядка.

Описанная в данной работе методика моделирования и получения результатов, подбора параметров и сравнительной оценки может применяться для других вариантов схем, не рассматриваемых в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Краев А. П. Основы геоэлектрики: Учебное пособие для студентов геофизической специальности геологоразведочных вузов и геологических факультетов. — Изд. 2-е (исправленное и дополненное). — Л.: Изд-во «Недра», 1965.
2. Коструба С. И. Измерение удельного сопротивления грунта. Предпроектные изыскания для сооружения заземляющих устройств. — Журнал «Новости электротехники», № 6(18) 2002–1(19) 2003.
3. В.К. Хмелевской, Электроразведка, изд. 2-е — М.: Изд-во МГУ, 1984 г. С ил., 422с.
4. Электрическое зондирование геологической среды. /Ред. В. К. Хмелевской и В. А. Шевнин. М., МГУ. Ч. 1 1988, Ч. 2 1992. 140 с.
5. Светов Б. С. Основы геоэлектрики. Изд-во ЛКИ, 2008.
6. Бесекерский В. А. Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное —М.: Изд-во «Наука», Главная редакция физико- математической литературы, М., 1975.
7. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. Пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Наука, 1989.
8. Вавилов А.А., Имаев Д. Х.. Машинные методы расчета систем управления. — Л.: Изд- во ЛГУ, 1981.
9. Воронов А. А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979.
10. Математические основы теории автоматического регулирования. Т. 1, 2/Под ред. Б. К. Чемоданова. — М.: Высшая школа, 1977.
11. Evan W. R., Control System Dynamics. New York, 1954.
12. Basic Feedback Control System Dsign. New York, 1958.
13. Zaden L. A., Desoer C. A., Linear Systems Theory. McGraw-Hill, New York, 1963.
14. Лазарев Юрий Федорович Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие. — К.: НТУУ «КПИ», 2003. — 424 с.
15. Краснопрошина А. А., Репникова Н. Б., Ильченко А. А. Современный анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, ControlSystem: Учебное пособие. — К.: «Корнійчук», 1999. — 144 с.