

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ НА БАЗЕ СРЕДЫ SIMINTECH

Я. Р. Саввин¹ [0009-0003-6920-9283], Д. В. Вершинин² [0009-0006-2603-8914]

^{1, 2} Национальный исследовательский институт «МЭИ», г. Москва, Россия

¹savvinyr@mpei.ru, ²vershinindv@mpei.ru

Аннотация

Изучены возможности среды имитационного моделирования SimInTech для создания программного комплекса, пригодного для выявления зависимостей между параметрами системы автоматического управления (САУ) и показателями качества ее работы. Рассмотрены инструменты выбранной среды, на основе которых разработана совокупность образовательных моделей. Показаны результаты работы созданного учебного комплекса на примере решения задачи коррекции линейной непрерывной системы автоматического управления с отрицательной обратной связью при использовании пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД)-регулятора, входящего в САУ последовательно, задачи адаптивного управления линейной непрерывной системы с явно заданной эталонной моделью и задачи многомерного сканирования с целью выяснения закономерностей выбранной системы.

Ключевые слова: система автоматического управления, ПИД-регулятор, линейная непрерывная система, автоматизация, среда имитационного моделирования SimInTech.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация – это процесс внедрения технических и программных средств в производство с целью замены ручного человеческого труда на автоматические или автоматизированные системы управления. В настоящее время пользу автоматизации трудно переоценить, так как исключение человеческого фактора в рутинных задачах способствует повышению эффективности работы, понижению числа ошибок и сокращению несчастных случаев на производстве.

В свою очередь сотрудники освобождаются от выполнения однотипных действий и могут сосредоточиться на более сложных задачах, требующих креативного подхода и большого количества времени на свое решение.

В связи с ростом потребностей автоматизации производственных процессов в промышленности, как следствие, повысился и спрос на специалистов в данной области. Постоянно увеличивающаяся потребность в инженерах по автоматизации ставит вопрос о подготовке таких специалистов для рынка труда.

Системы имитационного моделирования являются мощным инструментом в области автоматизации технических процессов. Они позволяют создавать и анализировать модели как простых, так и сложных физических объектов. Их использование в процессе обучения студентов позволит будущим специалистам получить практический опыт работы с системами автоматического управления и изучить принципы их анализа и синтеза.

В настоящей работе представлены результаты использования системы динамического моделирования SimInTech. Эта программа является отечественным аналогом среды Matlab/Simulink. Благодаря свободному распространению SimInTech выбранную систему можно использовать в учебных лабораториях.

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ СРЕДЫ SimInTech

Simintech является модульным программным обеспечением, в состав которого входят несколько математических ядер, база данных, графическая среда разработки, кодогенераторы и другие модули. Наиболее распространенные операторы и функции представлены в виде блоков, входящих в ту или иную библиотеку блоков. Рассмотрим некоторые из них.

1. *Источники, имитирующие различные типовые воздействия на систему.* У данного вида блоков отсутствует входной сигнал, поэтому нет портов входа. Перечислим источники, которые используются в настоящей работе.

1.1. Часы, представленные на рис. 1.а. Они формируют на выходе сигнал текущего модельного времени выполняемой задачи согласно формуле

$$y(t) = t,$$

где $y(t)$ – выходной скалярный сигнал, единицы измерения – секунды.

1.2. Ступенчатый сигнал, приведенный на рис. 1.б. Этот блок формирует значение на выходе, согласно формуле

$$y(t) = \begin{cases} y_0 & \text{при } t \leq t_0, \\ y_1 & \text{при } t > t_0, \end{cases}$$

где t_0 – время срабатывания, y_0 – начальное значение, y_1 – конечное значение, t – текущее модельное время в секундах.

1.3. Постоянный сигнал, указанный на рис. 1.в. Этот блок формирует выходной сигнал в соответствии с формулой

$$y(t) = y_0,$$

где y_0 – заданное значение, t – текущее модельное время в секундах.

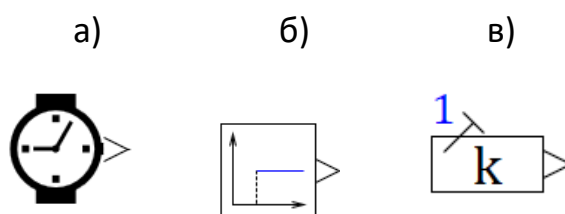


Рис. 1. а) Часы, б) Ступенчатый сигнал, в) Постоянный сигнал.

Среди источников также имеются реализации других видов сигналов (линейный, синусоидальный и т. д.), но они не используются в настоящей работе.

2. Операторы, отвечающие за выполнение в процессе моделирования самых простых математических действий с сигналами. Выделим наиболее используемые операторы.

2.1. Сумматор, изображенный на рис. 2.а. Блок является векторным и реализует поэлементное алгебраическое сложение входных сигналов с учетом их весовых коэффициентов

$$y(t) = a_1 u_1(t) + a_2 u_2(t) + \dots + a_n u_n(t),$$

где $y(t)$ – выходной сигнал блока; $u_1(t)$, $u_2(t)$, ..., $u_n(t)$ – входные сигналы; a_1 , a_2 , ..., a_n – весовые коэффициенты для каждого входного сигнала блока.

2.2. Сравнивающее устройство, приведенное на рис. 2.б. Блок является векторным и выполняет поэлементное вычитание второго входного сигнала из первого:

$$y(t) = u_1(t) - u_2(t),$$

где $y(t)$ – выходной сигнал блока; $u_1(t)$, $u_2(t)$ – входные сигналы.

2.3. Усилитель, изображенный на рис. 2.в. Блок отвечает за умножение/усиление входной величины на заданный коэффициент k , согласно формуле (если входной сигнал является скалярным)

$$y(t) = ku(t),$$

или поэлементное умножение входного векторного сигнала на заданный коэффициент усиления k :

$$y_i(t) = ku_i(t), \quad i = 1, \dots, n,$$

где $u_i(t)$ – i -й элемент входного векторного сигнала $u(t)$, $y_i(t)$ – элемент выходного векторного сигнала $y(t)$, n – размерность входа и выхода.

2.4. Абсолютное значение, которое указано на рис. 2.г. Блок выполняет вычисление модуля входной величины. Для скалярного сигнала

$$y(t) = |u(t)|,$$

где $u(t)$, $y(t)$ – входной и выходной сигналы.

Для векторного входного сигнала

$$y_i(t) = |u_i(t)|, \quad i = 1, \dots, n \geq 2,$$

где $u_i(t)$ – i -е элементы входного векторного сигнала, $y_i(t)$ – i -е элементы выходного векторного сигнала.

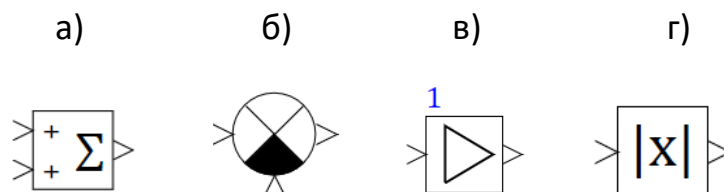


Рис. 2. а) Сумматор, б) Сравнивающее устройство, в) Усилитель, г) Абсолютное значение.

3. *Динамические блоки.* Вкладка содержит в себе типовые блоки, динамику которых можно описать линейными обыкновенными дифференциальными уравнениями. Укажем наиболее используемые динамические блоки.

3.1. Инерционное звено 1 порядка, указано на рис. 3.а. Блок является векторным и реализует математическую модель звена, описанную формулой (при выполнении нулевых предначальных условий)

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1},$$

где k – коэффициент усиления системы, T – постоянная времени, p – переменная Лапласа.

3.2. Передаточная функция общего вида, изображена на рис. 3.б. Блок отвечает за реализацию математической модели звена, описанной формулой (при выполнении нулевых начальных условий)

$$W(p) = \frac{b_m p^m + \dots + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

где a_i, b_j – коэффициенты ($i = 0, \dots, n, j = 0, \dots, m, n \geq m$);

3.3. Блок языка программирования, приведен на рис. 3.в. Этот блок предназначен для создания пользовательских блоков, выполняющих нетривиальные операции. Пользователь может на встроенном языке программирования реализовывать произвольные алгоритмы работы системы.

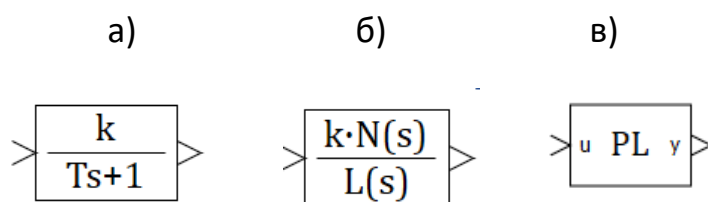


Рис. 3. а) Инерционное звено 1 порядка, б) Передаточная функция общего вида, в) Блок «Язык программирования».

4. *Дискретные блоки.* Динамика блоков данной вкладки описывается с помощью дискретных передаточных функций и линейных разностных уравнений состояния. Использование блоков из данной вкладки необходимо для автомати-

ческого вычисления значений показателей качества. При достаточно высокой частоте квантования систему, содержащую дискретные блоки, можно считать непрерывной. Перечислим наиболее используемые дискретные блоки.

4.1. Запоздывание на период квантования (рис. 4.а). Блок реализует дискретное запоздывание входного сигнала на величину, равную одному периоду квантования:

$$y(t) = x(t[k - 1]),$$

где $y(t)$ – значение выходного сигнала в текущий момент расчетного (модельного) времени, $x(t[k - 1])$ – значение входного сигнала в предпоследний момент дискретизации $t[k - 1]$. Квантование происходит с периодом T , который задается параметром блока.

4.2. Дискретный ПИД-регулятор, изображен на рис. 4.б. В этом блоке реализована передаточная функция дискретного ПИД-регулятора:

$$W(z) = K_P + K_I \frac{Tz}{z - 1} + K_D \frac{z - 1}{Tz},$$

где K_P – пропорциональная составляющая, K_I – интегральная составляющая, K_D – дифференциальная составляющая, T – период квантования.

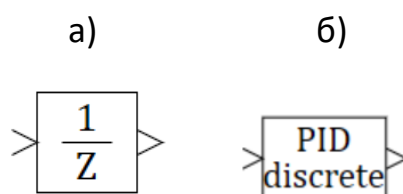


Рис. 4. а) Запоздывание на период квантования, б) Дискретный ПИД-регулятор.

5. *Сигналы.* Блоки данной вкладки обеспечивают обмен сигналами в процессе моделирования. Выделим наиболее часто используемые виды сигналов.

5.1. Чтение из списка сигналов (рис. 5.а). Блок производит считывание данных из локального списка сигналов/списка сигналов подключенной БД.

5.2. Запись в список сигналов, блок представлен на рис. 5.б. Производит запись данных в локальный список сигналов проекта/список сигналов подключенной БД.

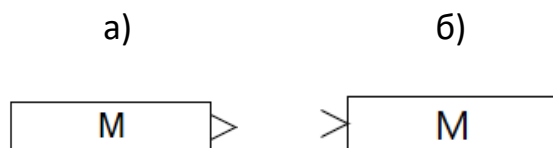


Рис. 5. а) Чтение из списка сигналов, б) Запись в список сигналов.

6. *Вывод данных.* Блоки данной вкладки отвечают за внешнее визуальное представление и запись данных модели в отдельные файлы. Приведем примеры блоков вывода данных.

6.1. Временной график, изображен на рис. 6.а. Блок позволяет отобразить текущие результаты моделирования в виде временных графиков одной или нескольких переменных.

6.2. Блок вывода данных в файл (рис. 6.б). Блок реализует запись данных в файл формата .txt. Каждая строка текстового файла выводится в виде: (время (величина 1) ... (величина n)).

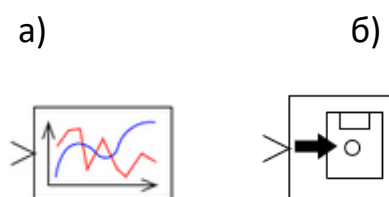


Рис. 6. а) Временной график, б) Блок вывода данных в файл.

БАЗА ДАННЫХ SIMINTECH

Для структурированного хранения сигналов и переменных в SimInTech есть возможность подключения внешней (относительно файлов проекта) базы данных (БД). Именно благодаря использованию БД можно реализовывать модели, которые в автоматическом режиме будут вычислять текущие показатели качества и выполнять на их основе коррекцию САУ. Внешний вид БД представлен на рис. 7.

Редактор базы данных сигналов: C:\Users\Ярослав\Desktop\Диплом\Диплом\База_данных_сигналов.db

Редактор Настройки Состояние сети

Группа Сводная

№	Категории	№	Группы сигналов	№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	CAU	1	IshodnieParametri	1	tust	Время регулирования	Веществен...		121	Переменная
		2	MetodCigleraNikolsa	2	ymax	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.1372918	Переменная
		3	SimpleksMetod	3	yust	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.0013483	Переменная
		4	SimpleksMetod2	4	deltast	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Isho...	0.0013483024	Переменная
		5	OblastResheniy	5	sigma	Перерегулирование	Веществен...	(Ishodnie...	13.576042	Переменная

Фильтр категорий: Все (*) Фильтр групп сигналов: Все (*) Фильтр имени сигналов: Все (*) Объединение: И Фильтр названия сигналов: Все (*)

OK

Рис. 7. База данных SimInTech.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОРРЕКЦИИ САУ

Структура исследуемой системы автоматического управления представлена на рис. 8. Использование замкнутой структуры САУ позволит производить компенсацию возмущающих воздействий для достижения требуемых значений показателей качества: устойчивости, точности, быстродействия и перерегулирования системы. Поведение объекта управления может быть описано динамическим звеном произвольного порядка, потому что исследование устойчивости системы управления будет проводиться по графику ее переходного процесса. Для примера в качестве объекта управления будем использовать звено 3-го порядка

$$W(p) = \frac{100}{(1 + p)(1 + 10p)(1 + 100p)},$$

так как в данном случае САУ может быть неустойчивой (запас по фазе в системе автоматического управления будет стремиться к -90°). Кроме того, в состав САУ добавим возмущающее воздействие, динамику которого можно описать инерционным звеном 1-го порядка

$$W(p) = \frac{1}{(1 + 0.5p)}.$$

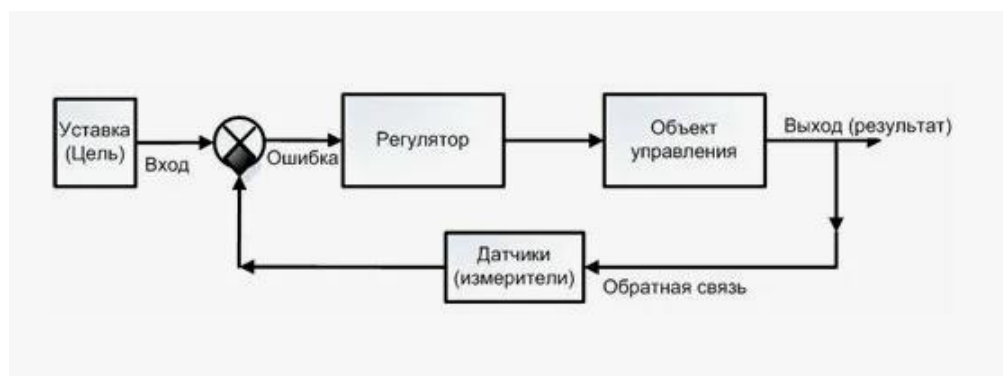


Рис. 8. Структура САУ.

В качестве регулятора будем использовать ПИД-регулятор из-за простоты его работы, причем его дискретную версию. Это позволит нам использовать дискретный блок задержки на один квант времени для определения времени регулирования САУ на основе текущей ошибки управления (рис.9). Если ошибка управления в какой-то момент времени будет меньше заданного порога (в данном случае 5%), то текущий момент будет зафиксирован и записан в БД. Если после фиксации времени регулирования ошибка вновь превысит указанный порог, то в БД будет записываться текущее модельное время. Такая проверка выполняется на протяжении всей работы системы управления.

Для определения численных значений показателей качества будем записывать в БД следующие показатели:

- 1) значение сигнала на выходе САУ, обозначенное как Y_u ;
- 2) время регулирования T_u , полученное в результате работы субструктуры «Расчет показателей качества» (рис. 9, верхняя часть);
- 3) максимальное значение переходного процесса САУ Y_m , полученное в результате работы субструктуры «Расчет показателей качества» (рис. 9, нижняя часть).

Статическую ошибку регулирования будем вычислять по формуле

$$D = |1 - Y_u|,$$

где D – значение статической ошибки регулирования, Y_u – установившееся значения выходного сигнала системы управления, а значение перерегулирования – по формуле

$$S = \frac{Y_m - Y_u}{Y_u} 100,$$

где S – перерегулирование системы управления, Y_m – максимальное значение выходного сигнала системы управления, Y_u – установившееся значение выходного сигнала системы управления. Реализованная схема моделирования показана на рис. 9– 11.

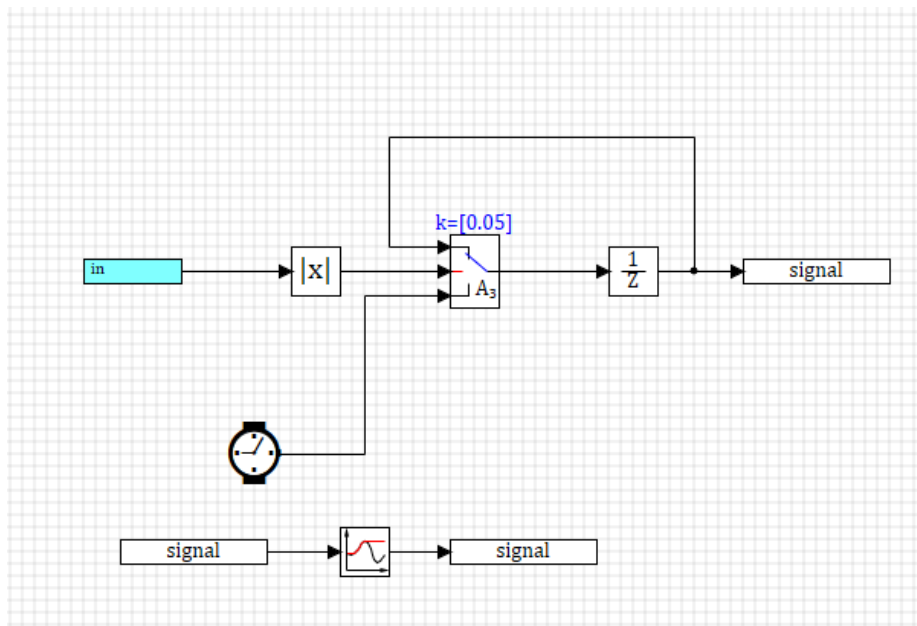


Рис. 9. Субструктура «Расчет показателей качества».

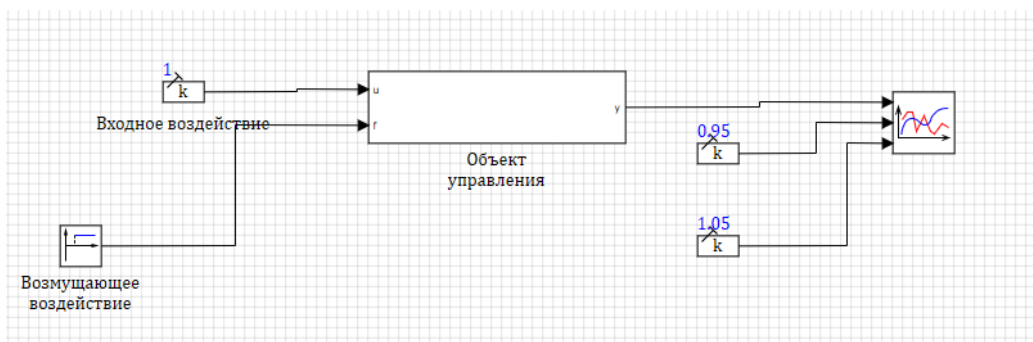


Рис. 10. Общий вид схемы моделирования.

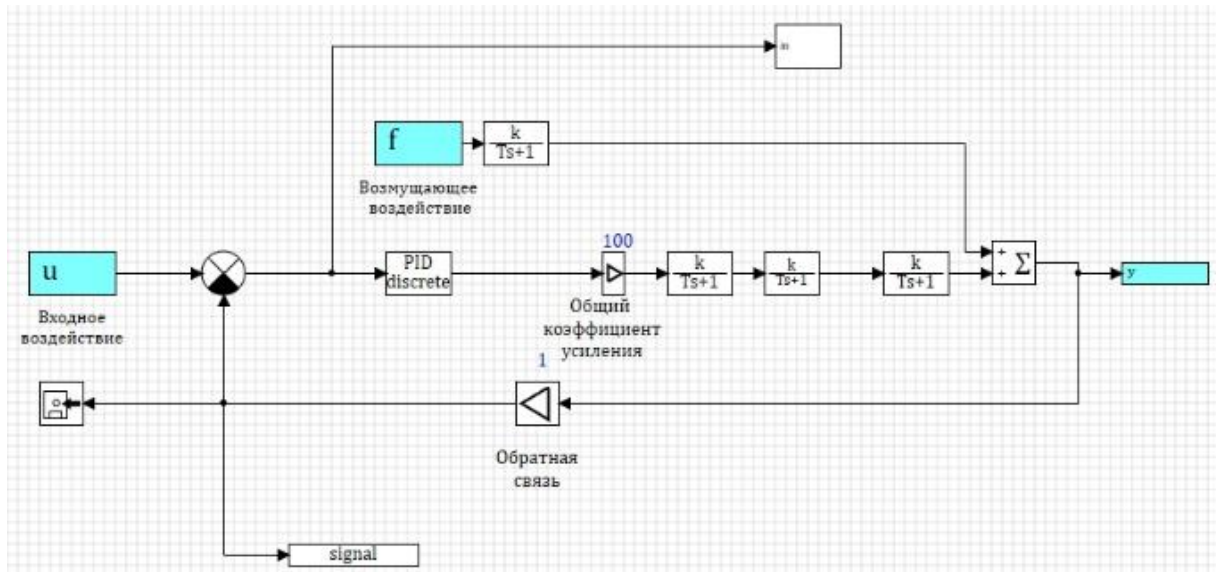


Рис. 11. Субструктура «Объект управления».

Результаты работы САУ до настройки ПИД-регулятора представлены на рис. 12 и 13. Можно заметить, что время работы САУ оставляет желать лучшего (121 с модельного времени), перерегулирование составляет 13.5%, а сам переходной процесс происходит с колебаниями, чего быть не должно. Проведем коррекцию системы управления.

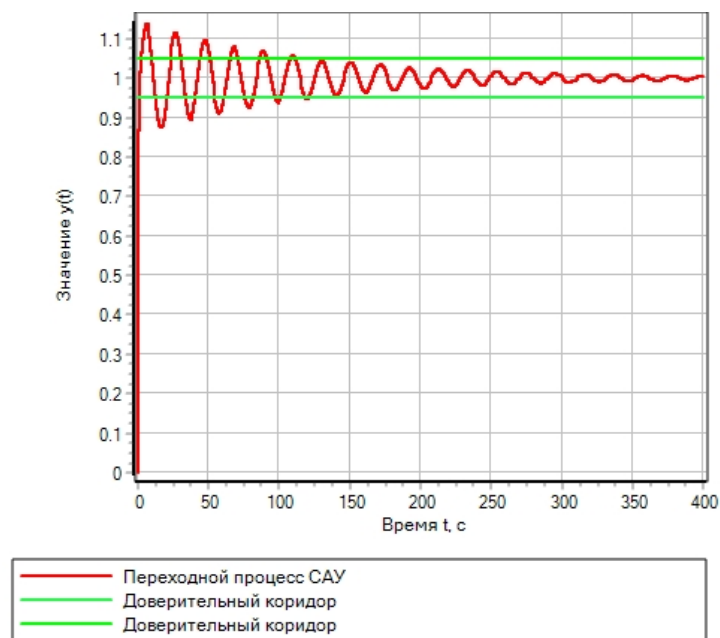


Рис. 12. График переходного процесса САУ до коррекции.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tust	Время регулирования	Веществен...		121	Переменная
2	y _{max}	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.1372918	Переменная
3	y _{ust}	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.0013483	Переменная
4	deltast	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Isho...	0.0013483024	Переменная
5	sigma	Перерегулирование	Веществен...	(Ishodnie...	13.576042	Переменная

Рис. 13. Показатели качества САУ до коррекции.

Настройку регулятора будем проводить с помощью неточного метода Циглера – Никольса и последующей донастройкой с применением оптимизационных методов, в частности симплекс-метода. Неточная настройка позволит нам получить начальное приближение для дальнейшего применения симплекс-метода, который чувствителен к выбору начальной точки. Данный метод реализуем при помощи блока программирования среды SimInTech (рис. 14).

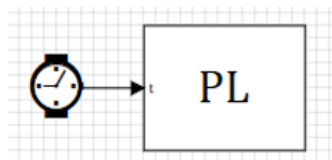


Рис. 14. Схема запуска алгоритма метода Циглера – Никольса.

Логика программы следующая: параметры регулятора в субструктуре «Объект управления» приравняются к 0, кроме пропорциональной составляющей K_p (она приравняется к 0.0001). После этого сохраняется текущее состояние САУ для последующего поиска предельного коэффициента усиления, при котором в САУ появляются незатухающие колебания, и периода таких колебаний. В течение моделирования производятся поиск времени, за которое происходит четверть первого полного колебания, и проверка устойчивости (амплитуда первого колебания должна быть не меньше амплитудных значений всех последующих колебаний). Такая проверка происходит на основе записываемых в БД переменных y_{ust} и y_{max} . Если получившийся процесс является устойчивым, то заново запускается моделирование работы САУ, но уже с увеличенным значением K_p на один шаг (например, на 1). Если работа САУ является неустойчивой, то происходит возврат на предыдущее значение K_p и уменьшение шага в 2 раза. Данный процесс повторяется, пока значение шага больше заданного порога, например, 0.001. При этом в системе не должно быть расходящихся колебаний.

В результате работы алгоритма мы получаем значение предельного коэффициента усиления и период незатухающих колебаний для первоначальной настройки по методу Циглера – Никольса.

Результаты неточной настройки САУ представлены на рис. 15 и 16. Видно, что быстродействие системы увеличилось почти в 3 раза (время регулирования составляет 47 с), но перерегулирование увеличилось почти до 32%. Проведем донастройку регулятора при помощи встроенного в среду блока оптимизации.

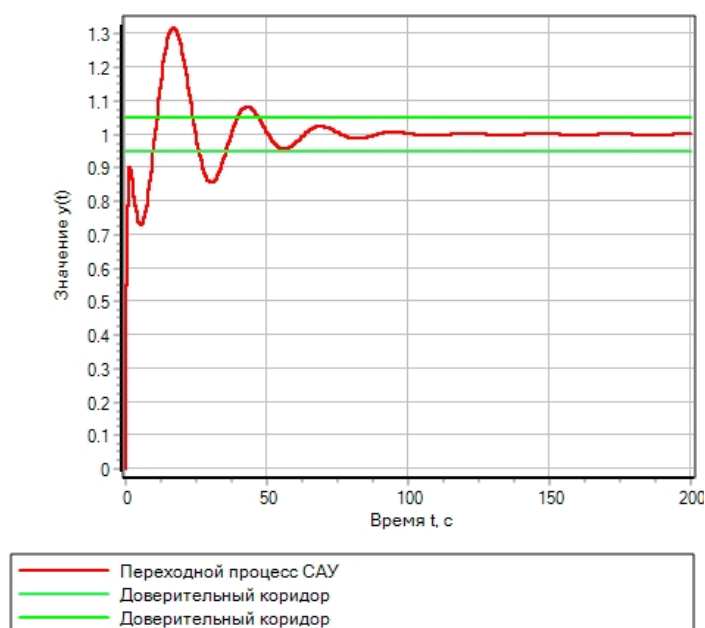


Рис. 15. График переходного процесса САУ после неточной настройки.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tust1	Время регулирования	Веществен...		47	Переменная
2	y _{max} 1	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.3187074	Переменная
3	y _{ust} 1	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1	Переменная
4	deltast1	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Meto...	0	Переменная
5	sigma1	Перерегулирование	Веществен...	(MetodCi...	31.870738	Переменная
6	kp1	Пропорциональный коэффициент П...	Веществен...	MetodCig...	0.73248187	Переменная
7	ki1	Интегральный коэффициент ПИД-р...	Веществен...	MetodCig...	0.077519513	Переменная
8	kd1	Дифференциальный коэффициент ...	Веществен...	MetodCig...	1.7303053	Переменная
9	kp _{pred}	Предельное значение kp1 для мето...	Веществен...		1.2208031	Переменная
10	T _{koleb}	Период незатухающих колебаний	Веществен...		18.898	Переменная
11	Neust	Флаг для выявления неустойчивост...	Веществен...		0	Переменная

Рис. 16. Показатели качества САУ после неточной настройки.

Схема моделирования для донастройки регулятора приведена на рис. 17. Главным отличием этой схемы является добавление блока оптимизации. На вход данного блока подаются значения текущих показателей качества (время регулирования и перерегулирования), на выход – значения параметров регулятора, которые необходимо подобрать. Завершение работы схемы происходит в трех случаях:

- 1) настройка регулятора завершена, так как показатели качества удовлетворяют ограничениям (ограничения задаются в виде интервала допустимых значений);
- 2) настройка регулятора не завершена, так как достигнуто максимальное число построений переходного процесса (данное пороговое значение задается, изначально оно равно 300);
- 3) настройка регулятора не завершена, так как переходной процесс не завершился (нужно увеличить конечное время моделирования в настройках среды).

Помимо настройки ПИД-регулятора происходит сохранение значений его параметров и показателей качества САУ для дальнейшей обработки.

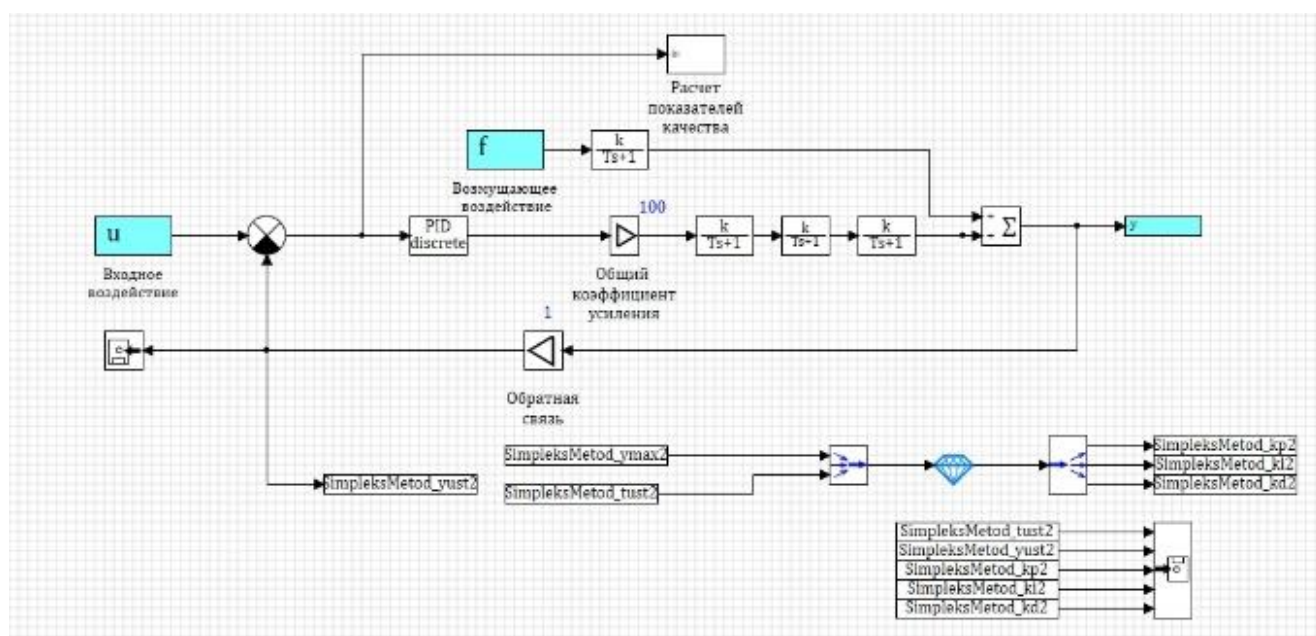


Рис. 17. Схема моделирования с использованием блока оптимизации.

Результаты настройки САУ приведены на рис. 18 и 19. Как можно заметить, быстродействие САУ после донастройки увеличилось в 121 раз по сравнению с системой управления без коррекции, перерегулирование при этом меньше 1%.

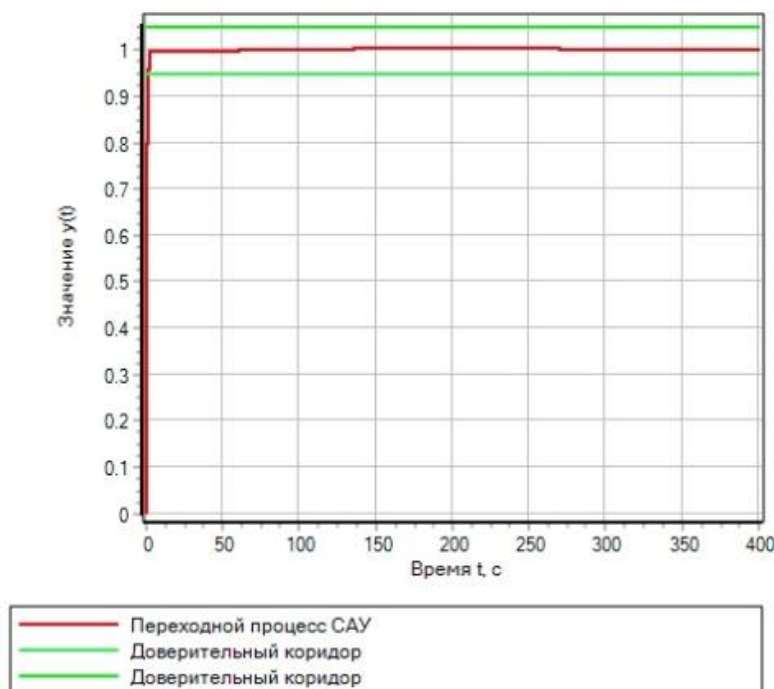


Рис. 18. График переходного процесса САУ после коррекции.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tust2	Время регулирования	Веществен...		1	Переменная
2	ymax2	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.0035995	Переменная
3	yust2	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.0003562	Переменная
4	deltast2	Статическая ошибка	Веществен...	$abs(Simp...$	0.00035617837	Переменная
5	sigma2	Перерегулирование	Веществен...	$(Simplek...$	0.32421473	Переменная
6	kp2	Пропорциональный коэффициент П...	Веществен...		0.0001	Переменная
7	ki2	Интегральный коэффициент ПИД-р...	Веществен...		0.0001	Переменная
8	kd2	Дифференциальный коэффициент ...	Веществен...		0.0001	Переменная

Рис. 19. Показатели качества САУ после коррекции.

Применение метода неточной настройки Циглера – Никольса справедливо для систем, которые могут быть неустойчивыми. Однако этот программный комплекс можно применять и для систем 2-го порядка и ниже. В таком случае выбирать начальное приближение для блока оптимизации придется вручную. Кроме того, неустойчивость исходной САУ также не является ограничением применения разработанного алгоритма. Приведем результаты коррекции неустойчивой системы управления. В качестве объекта управления возьмем динамическое

звено 4-го порядка

$$W(p) = \frac{50}{(1+p)(1+10p)(1+100p)(1+150p)}.$$

Результаты работы САУ до и после коррекции приведены на рис. 20–22.

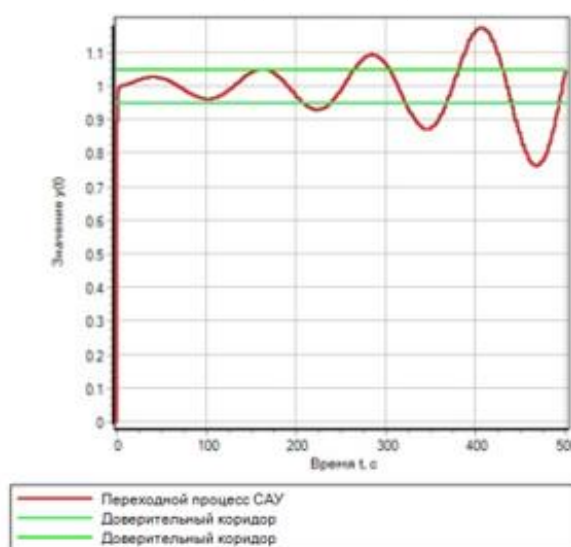


Рис. 20. График переходного процесса САУ до коррекции.

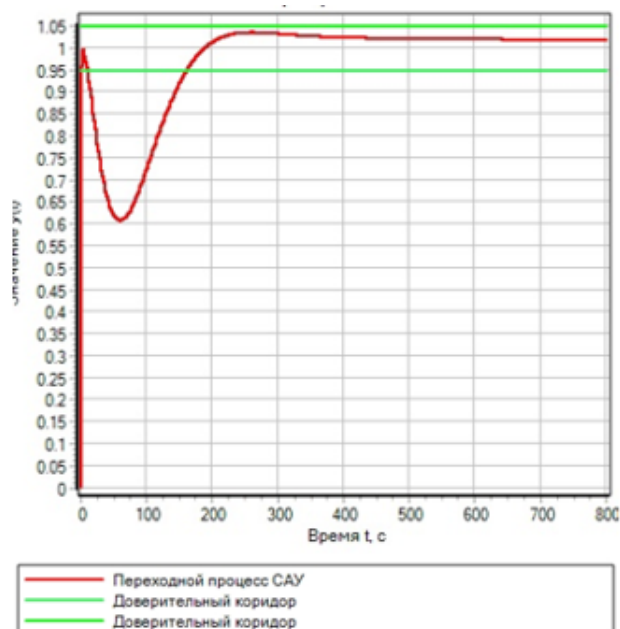


Рис. 21. График переходного процесса СА после коррекции.

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчета
1	tust2	Время регулирования	Веществен...		161	Переменная
2	ymax2	Максимальное значение выходного ...	Веществен...		1.0357583	Переменная
3	yust2	Установившееся значение выходно...	Веществен...		1.017726	Переменная
4	deltast2	Статическая ошибка	Веществен...	abs(Simp...	0.017726027	Переменная
5	sigma2	Перерегулирование	Веществен...	(Simplek...	1.7718246	Переменная
6	kp2	Пропорциональный коэффициент П...	Веществен...		0.12352461	Переменная
7	ki2	Интегральный коэффициент ПИД-р...	Веществен...		0.0001	Переменная
8	kd2	Дифференциальный коэффициент ...	Веществен...		5.5527629	Переменная

Рис. 22. Показатели качества САУ после коррекции.

На рис. 20–22 видно, что до коррекции САУ была неустойчива, а ее переходной процесс представляет собой расходящиеся колебания. После коррекции время регулирования системы управления составило 161 с модельного времени, а перерегулирование равняется почти 2%. Таким образом, неустойчивость САУ не является препятствием к применению реализованного ранее алгоритма настройки ПИД-регулятора.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ САУ

Структура исследуемой системы автоматического управления представлена на рис. 23. Из-за воздействия окружающей среды на систему автоматического управления или с течением времени эксплуатации параметры объекта управления могут изменяться, а такие показатели качества, как точность работы системы, время регулирования и перерегулирование, могут ухудшиться. Исходная САУ представлена на рис. 23.

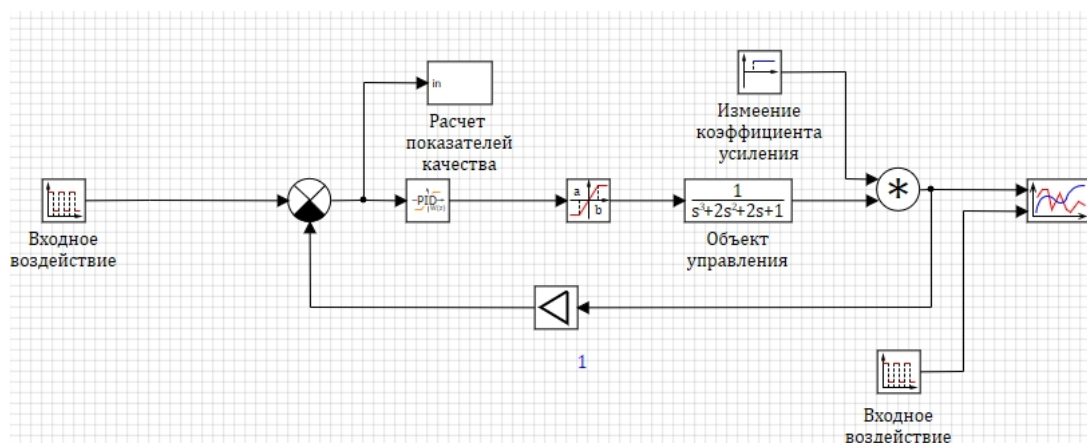


Рис. 23. Схема исходной САУ без механизма адаптации.

Пусть динамика объекта управления будет описываться динамическим звеном 3-го порядка

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + 2p^3 + 2p + 1}.$$

Параметры ПИД-регулятора: $K_P = 1$, $K_I = 0.2$, $K_D = 1$. Пусть в момент времени $t = 210$ происходит увеличение коэффициента усиления системы в 20 раз. Переходной процесс исходной САУ представлен на рис. 34.

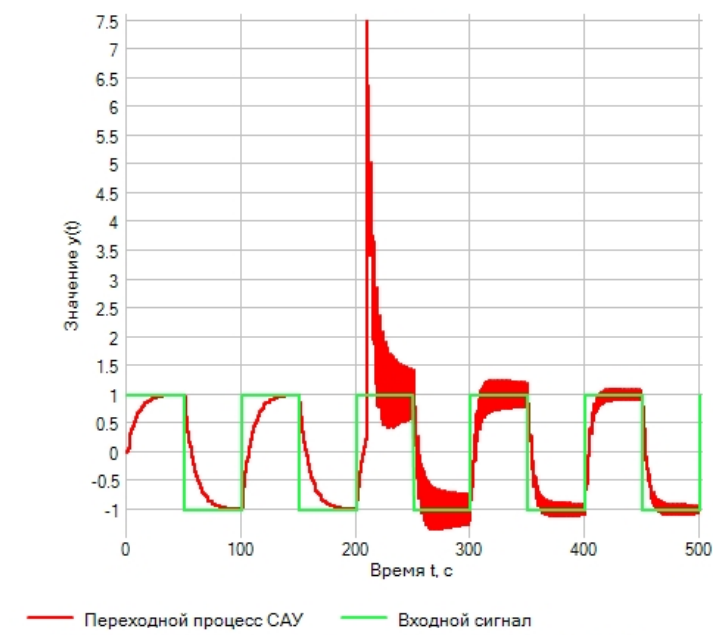


Рис. 24. Переходной процесс исходной САУ.

Как видно на рис. 24, после изменения коэффициента усиления в системе на выходе появились высокочастотные колебания. Со временем их амплитуда уменьшается, но происходит это довольно медленно. Попробуем использовать механизм адаптации.

Для компенсации воздействия окружающей среды будем использовать адаптивную САУ с заданной явно эталонной моделью (рис. 25). В качестве эталонной модели возьмем динамическое звено 3-го порядка с передаточной функцией, описанной формулой

$$W(p) = \frac{1}{p^3 + 5p^3 + 5p + 1}.$$

Сигнал поправки, формируемый в контуре адаптации, приведен в формуле

$$L = (y - y_e) y_e \frac{-gTz}{z - 1},$$

где y – выходной сигнал замкнутой САУ, y_e – выходной сигнал эталонной модели, g – параметр обучения от 0 до 1 (пусть, например, равен 0.4), T – период квантования (0.001), z – дискретный оператор.

Выходной сигнал после поправки $y = LU$, где L – сигнал поправки, U – управляющее воздействие регулятора.

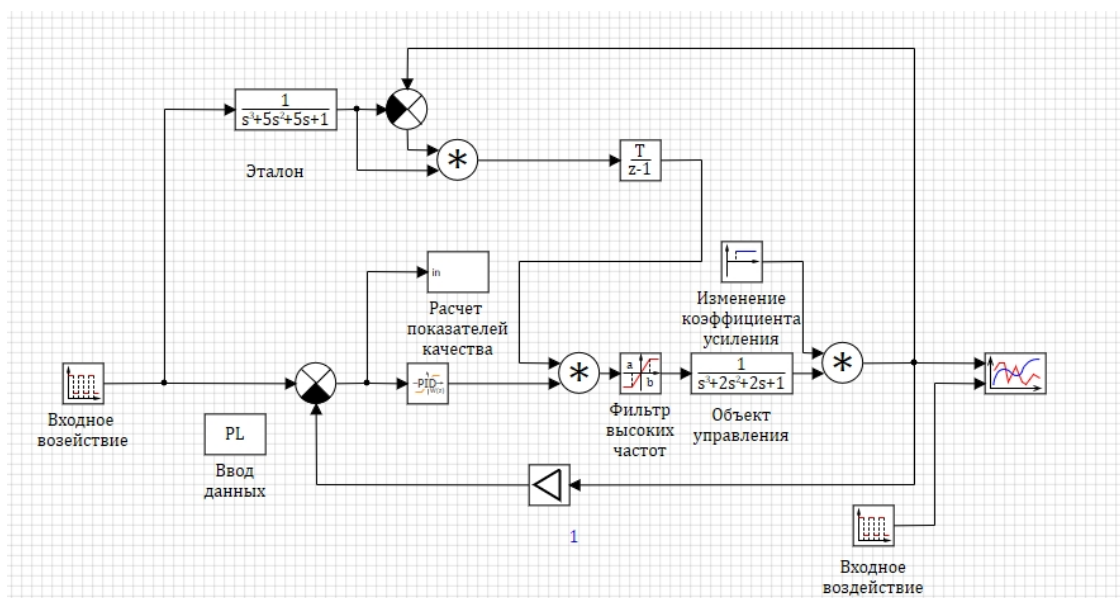


Рис. 25. Схема САУ с механизмом адаптации.

За ввод параметров отвечает программа, написанная на языке Python, которая вызывается внутри блока программирования. Диалоговое окно представлено на рис. 26. Пользователю предлагается указать порядок системы управления, параметры эталонной модели и объекта управления и шаг их изменения (при необходимости), амплитуду и момент изменения коэффициента усиления системы. Введенные данные в виде соответствующих векторов значений возвращаются в схему моделирования SimInTech на первой итерации процесса моделирования. Переходной процесс САУ с механизмом адаптации указан на рис. 27.

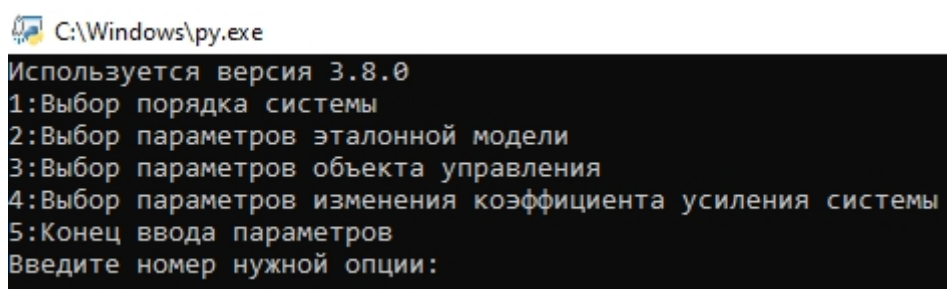


Рис. 26. Диалоговое окно ввода параметров.

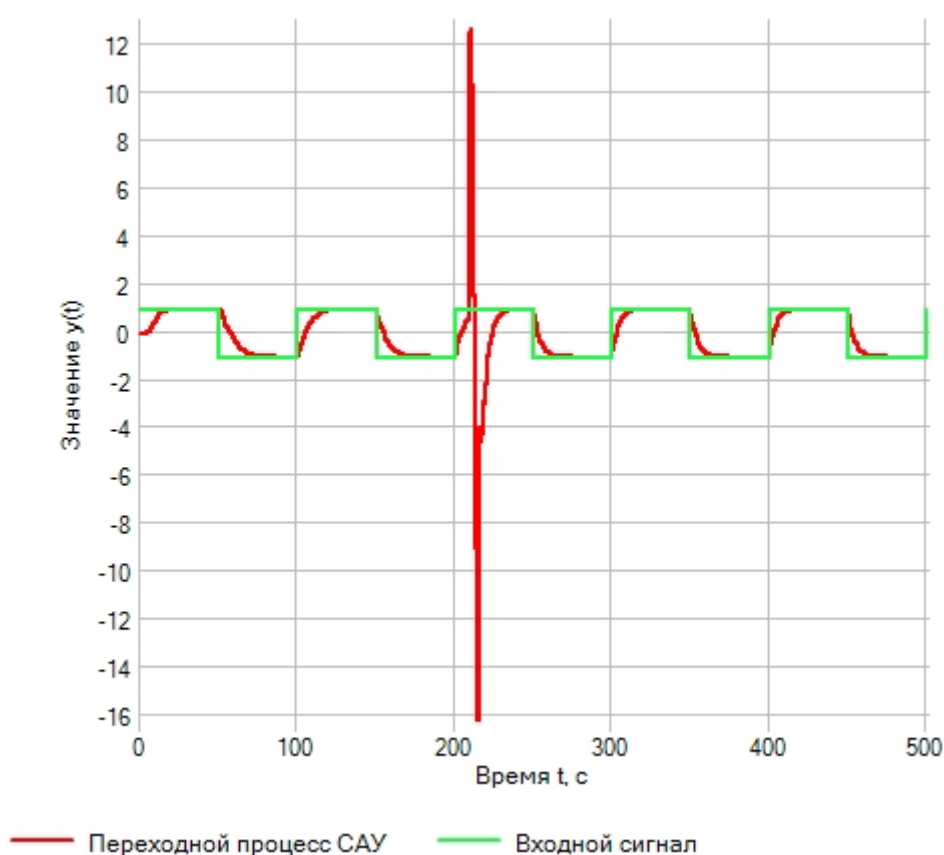


Рис. 27. Переходной процесс адаптивной САУ.

На рис. 27 видно, что после изменения коэффициента усиления переходной процесс протекает гладко, без высокочастотных колебаний. Время регулирования в пределах одного меандра после скачка составляет 20 с модельного времени, а перегулирование – 0% (переходной процесс протекает без колебаний).

Отметим, что успех применения данного механизма адаптации зависит от выбранной эталонной модели. При слишком сильном различии объекта управления и эталона возможна потеря качества работы системы, что является недостатком данной адаптивной системы.

ПОСТРОЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА САУ ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА

Помимо решения задачи коррекции качества работы САУ с вычислением численных значений показателей качества (точность, быстродействие и перерегулирование) на базе средств среды SimInTech можно представлять в графическом виде зависимости качества работы САУ от конфигурации используемого регулятора, в данном случае ПИД-регулятора. Для этого реализуем метод многомерного сканирования. Общий вид схемы моделирования остается прежним (но без блока оптимизации), однако изменяется содержимое блока программирования с рис. 14. На рис. 28 представлен портрет решений. Как можно заметить, область допустимых значений представляет собой каньон с почти плоским дном. При слишком низком значении коэффициентов регулятора заметно резкое возрастание времени работы системы.

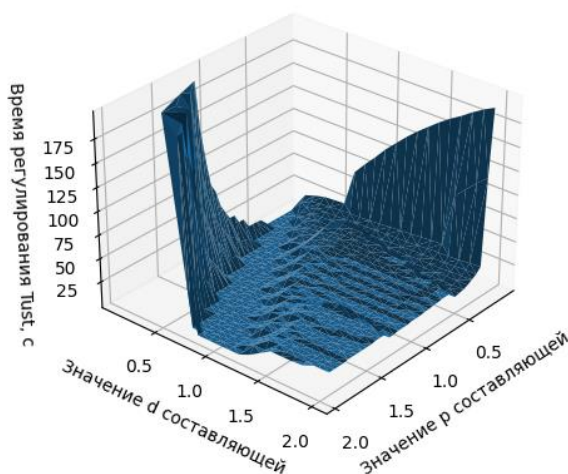


Рис. 28. Графическое представление зависимости времени регулирования от параметров регулятора.

Как и в случае решения задачи коррекции системы автоматического управления, метод многомерного сканирования также применим для САУ произволь-

ного порядка. При необходимости можно задать другие границы изменения параметров регулятора и их шаг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на базе инструментов среды имитационного моделирования среды SimInTech можно реализовывать программные комплексы для изучения основных принципов теории автоматического управления. Использование блока программирования позволяет реализовывать пользовательские программы, а встроенная база данных отлично справляется с хранением результатов моделирования разных сценариев. Представленные программные реализации позволяют проводить коррекцию САУ с целью повышения качества работы системы с минимальным участием пользователя и получать в графическом виде зависимости показателей качества от параметров используемого ПИД-регулятора для дальнейшего изучения. Полученные результаты проведенного исследования могут использоваться при разработке циклов лабораторных работ для студентов энергетических вузов с целью повышения качества подготовки будущих специалистов в области автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория автоматического управления. Под ред. А.А. Воронова. 1986. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления. Изд-во «Высшая школа», 1986. 367 с.
2. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирования в MATLAB: Учебное пособие для студентов физического факультета. СПб.: Издательство «Лань», 2021. 180 с.
3. Справочник по теории автоматического управления. Под редакцией А.А. Красовского. М.: Изд-во «Наука». Гл. ред. физ. -мат. лит., 1987. 712 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАЛИТ, 2003. 288 с.
5. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие. А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарное; Под ред. А.С. Ключева. М.: Энергоатомиздат, 1989. 368 с.

6. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования: учебное пособие / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. М.: ДМК Пресс, 2017. С. 241–243.
 7. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань 2019. 92 с.
 8. Справочная система среды SiminTech. <https://help.simintech.ru>
-

DEVELOPMENT OF AUTOMATED PROGRAMS FOR SOLVING APPLIED TASKS IN THE FIELD OF AUTOMATION BASED ON THE SIMINTECH ENVIRONMENT

Y. R. Savvin¹ [0009-0003-6920-9283], **D. V. Vershinin**² [0009-0006-2603-8914]

^{1, 2}*National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
Moscow, Russia*

¹savvinyr@mpei.ru, ²vershinindv@mpei.ru

Abstract

This article is devoted to the study of the possibilities of the SimInTech simulation environment for creating a software package suitable for identifying dependencies between the parameters of the automatic control system (ACS) and the quality indicators of its operation. The article discusses the tools of the selected environment, based on which a set of educational models has been developed. The article shows the results of the above-mentioned educational complex in the form of solving the problem of correcting a linear continuous automatic control system with negative feedback using a PID controller that is part of the automatic control system, the problem of adaptive control of a linear continuous system with a clearly defined reference model, and the problem of multidimensional scanning to identify the patterns of the selected system

Keywords: *automatic control system (ACS), PID controller, linear continuous system, automation, SimInTech simulation environment.*

REFERENCES

1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Voronova. 1986. Ch. 1. Teoriya lineinykh system avtomaticheskogo upravleniya, Izdatelstvo "Vishaya shkola", 1986, 367 s.
2. Sistemi avtomaticheskogo upravleniya: teoriya, primenenie, modelirovanie v MATLAB: Uchebnoe posobie dlya studentov fizicheskogo fakulteta. 4-e izd., ster. SPB: Izdatelstvo "Lan'", 2021. 180 s.
3. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod redakciei A.A. Krasovskogo. M.: Izd-vo "Nauka". Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987. 712 s.
4. Kim D.P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy. M.: FIZMALIT, 2003. 288 s.
5. Naladka sredstv avtomatizatsii i avtomaticheskikh system regulirovaniya: Spravochnoe posobie. A. S. Klueva. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomiz. dat, 1989, 368 s: il.
6. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tehnikeskikh system SimInTech: Praktikum po modelirovaniu system avtomaticheskogo regulirovaniya: uchebnoe posobie. M.: DMK Press, 2017. S. 241-243
7. Habarov S.P., Shilkina M.L. Osnovy modelirovaniya tehnikeskikh system. Sreda SimInTech: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg: Lan', 2019. 92 s.
8. Spravochnaya Sistema sredy SimInTech. <https://help.simintech.ru>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



САВВИН Ярослав Русланович – магистр института информационных и вычислительных технологий национального исследовательского университета МЭИ.

Yaroslav Ruslanovich SAVVIN – master's student at of the Institute of Information and Computing Technologies, National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

email: savvinyr@mpei.ru

ORCID: 0009-0003-6920-9283



ВЕРШИНИН Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент института информационных и вычислительных технологий национального исследовательского университета МЭИ

Dmitriy Victorovich VERSHININ – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Institute of Information and Computing Technologies, National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

email: vershinindv@mpei.ru

ORCID: 0009-0006-2603-8914

Материал поступил в редакцию 2 июня 2026 года