

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С АСИММЕТРИЧНЫМ ЛЮФТОМ

Гуляев С.В., Топка В.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

svgul@inbox.ru, topka3@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен импульсный ПИД регулятор ИПИДО, предназначенный для управления объектами с асимметричным люфтом, разработана имитационная модель регулятора. На имитационной модели проведено исследование работы регулятора ИПИДО в сравнении с регуляторами компенсирующими только симметричный люфт.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, асимметричный люфт, имитационная модель, переходной процесс, критерий качества регулирования.

Введение

Многие объекты в промышленности управляются механическими устройствами, в которых в процессе их функционирования возникает нежелательное явление называемое люфтом. Появление люфта вызывается механическим износом деталей исполнительных механизмов. Наличие люфта снижает качество управления, а в предельных случаях делает его невозможным. Поэтому задача устранения отрицательного влияния люфта является актуальной. Решить эту задачу можно различными способами. Прямой способ состоит в замене изношенного оборудования на новое. Ремонт оборудования связан с остановкой технологического процесса и с вызванными с этой остановкой экономическими потерями. Другой способ состоит в устранении нежелательного влияния люфтов алгоритмическим способом с помощью регуляторов с компенсацией люфта. В настоящее время промышленные системы управления, как отечественные, так и зарубежные имеют в своем составе регуляторы предусматривающие компенсацию люфта подбором специального вида регулирующего управления [1,2,3]. В существующих системах управления предусматривается, что люфт носит симметричный характер – величина зазора при движении исполнительного органа в прямом направлении равна величине зазора при движении в обратном направлении. Соответственно времена выбора люфта в прямом и обратном направлении равны. При этом не учитывается, что для многих объектов управления это не так. Например, воздействие рабочего тела на исполнительный механизм может изменять скорость перемещения рабочего органа регулятора. Поэтому скорости исполнительного механизма и соответственно времена выборки люфта в прямом и обратном направлении могут отличаться. При этом сама величина люфта остаётся постоянной. Именно в этом смысле можно говорить об асимметричном люфте. Таким образом, возникает задача разработки регулятора, компенсирующего такой асимметрический люфт.

1. Импульсный регулятор ИПИДО

Экспериментальным заводом научного приборостроения (ФГУП ЭЗАН), разработана мультиплатформенная SCADA-система «Соната». В состав SCADA-системы «Соната» входит ПИД регулятор для исполнительных механизмов постоянной скорости ИПИДО, разработанный совместно с Институтом проблем управления [3]. В алгоритме регулятора ИПИДО предусмотрена компенсация асимметричного люфта и учёт скорости исполнительного механизма в прямом и обратном направлении. Также алгоритм снабжен опциями безударного перехода от ручного режима к автоматическому. В случае исполнительного механизма с датчиком положения используется информация с этого датчика, при отсутствии такого датчика используется внутренняя модель исполнительного механизма.

Алгоритм ИПИДО реализован по следующей схеме, приведённой на рис. 1. В блоке ПИД в цифровой форме определяется значение ПИД-закона управления u в соответствии с передаточной функцией:

$$W(s) = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + sT_d} \right) \quad (1)$$

где K – коэффициент регулятора, T_i – время интегрирования, T_d – время дифференцирования [4].

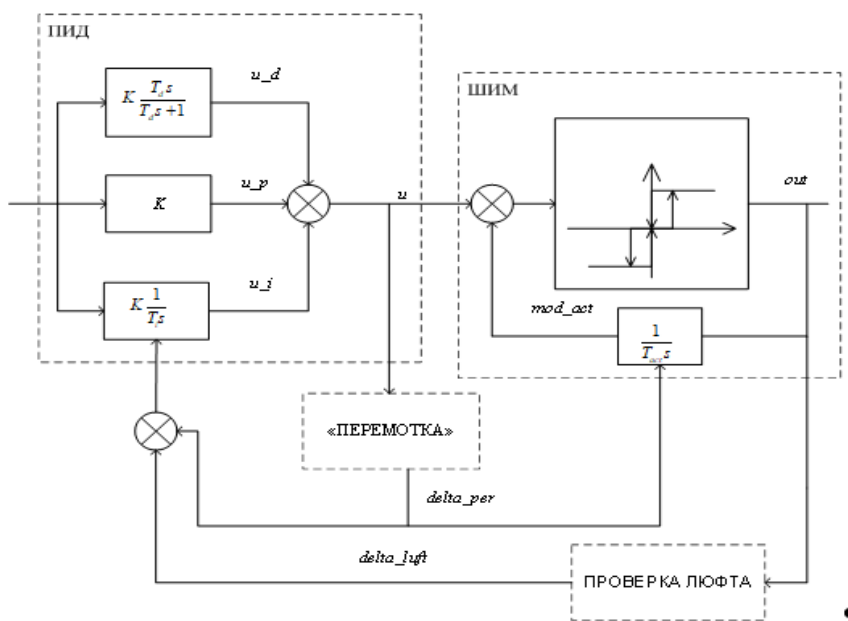


Рис. 1. Блок схема регулятора ИПИДО

Далее сигнал управления u поступает на блок ШИМ, выполненный в виде трёхпозиционного релейного элемента с гистерезисом, охваченным интегральной обратной связью.

Величина гистерезиса согласована со временем минимального импульса управляющего исполнительного механизма. Значение времени интеграла в обратной связи T_{act} определяется знаком выходного сигнала и соответствует временам полного хода исполнительного механизма в положительном и обратном направлении. Выход out блока ШИМ анализируется в блоке определения люфта рис. 2, в котором определяется момент подачи и величина сигнала компенсации люфта.

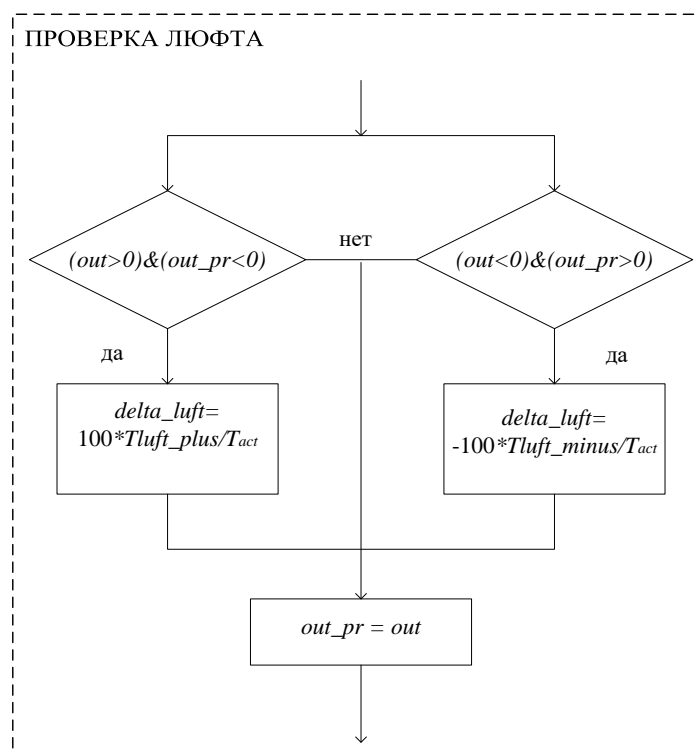


Рис. 2. Блок схема «ПРОВЕРКА ЛЮФТА»

При изменении направления хода исполнительного механизма на противоположный к интегральной составляющей блока ПИД u_i добавляется сигнал $delta_luft$, компенсирующий величину люфта в данном направлении. Времена выборки люфта в прямом и обратном направлении $Tluft_plus$ и $Tluft_minus$ задаются оператором. В алгоритме ИПИДО реализован механизм «перемотки» рис. 3,

устраняющий последствия возможного выхода модели исполнительного механизма на ограничения. При приближении этого выхода к границам возможного диапазона 5% - 95% осуществляется одновременный пересчёт значения интегральной составляющей блока ПИД u_i и выхода модели исполнительного механизма mod_act к значению в 50% .

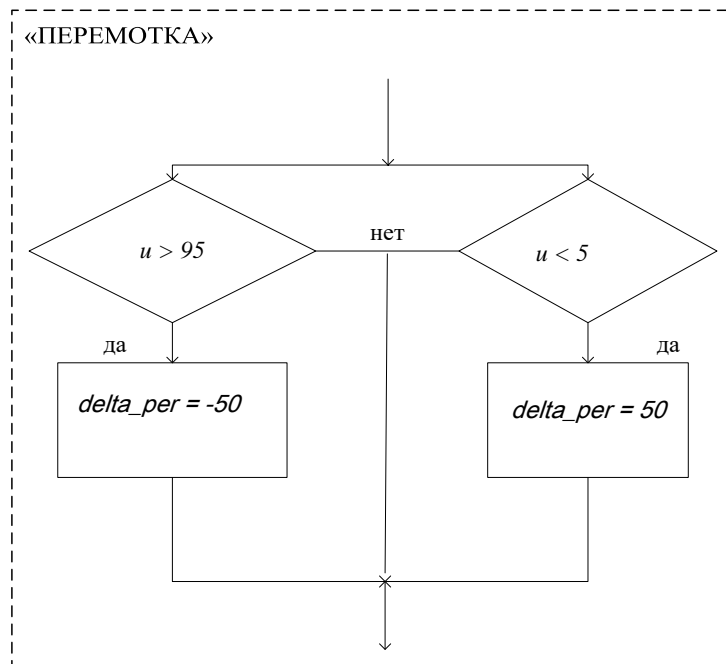


Рис. 3. Блок схема «ПЕРЕМОТКА»

2. Модель импульсного регулятора ИПИДО

В работе [3] приведено описание практического использования регулятора ИПИДО на конкретном энергетическом объекте, но в этой работе отсутствует обоснование эффективности его работы. В ряде работ [5,6] приводятся аналитические описания такого нелинейного объекта, как люфт. Но использовать эти описания для исследования работы рассматриваемого регулятора не представляется возможным. Поэтому для более полного исследования алгоритма ИПИДО использован метод имитационного моделирования этого алгоритма. Разработана модель алгоритма ИПИДО в системе моделирования динамических процессов Simulink и проведено моделирование его работы для некоторых типовых режимов в сравнении с типовыми алгоритмами, не поддерживающими регулирование объектами с асимметричным люфтом.

На рис. 4 - 8 представлены блок схемы процесса моделирования работы контура регулирования объектом с асимметричным люфтом. Модель представлена замкнутым контуром содержащим:

1. Объект регулирования Object с динамической частью описываемой передаточной функцией

$$W_{ob}(s) = \frac{1}{(Tmds + 1)^3} \quad (2)$$

люфтом и исполнительным механизмом постоянной скорости, описываемым передаточной функцией:

$$W_{act}(s) = \frac{1}{Tacts} \quad (3)$$

в которой время интегрирования T_{act} принимает различные величины соответствующие прямому и обратному направлениям.

2. ПИ регулятор PI_Regulator с возможностью внешнего управления состоянием интегральной составляющей Integrator2.

3. Широтно импульсный модулятор Pulse_Width_Modulator вырабатывающий импульсные управляющие воздействия для исполнительного механизма постоянной скорости также с

возможностью реагировать на изменение прямого и обратного направления.

4. Логический блок определения момента и величины компенсации люфта Control_Luft.

Модель соответствует алгоритму регулятора ИПИДО с некоторыми незначительными упрощениями.

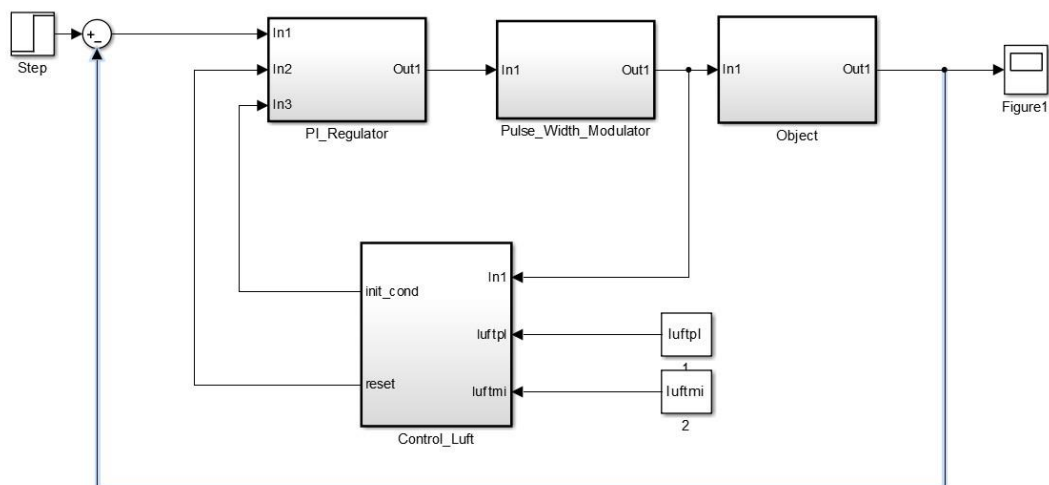


Рис. 4. Блок схема модели контура регулирования

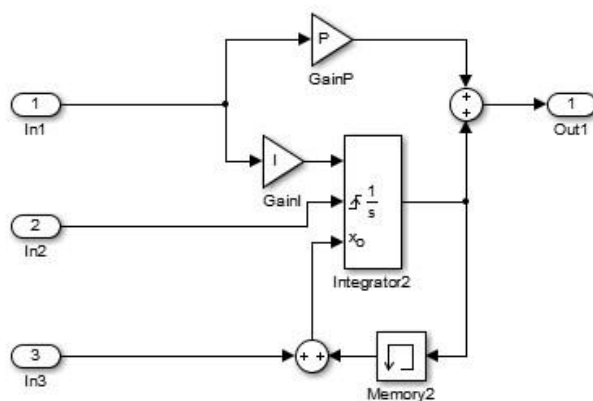


Рис. 5. Блок схема ПИ-регулятора с возможностью коррекции И-составляющей

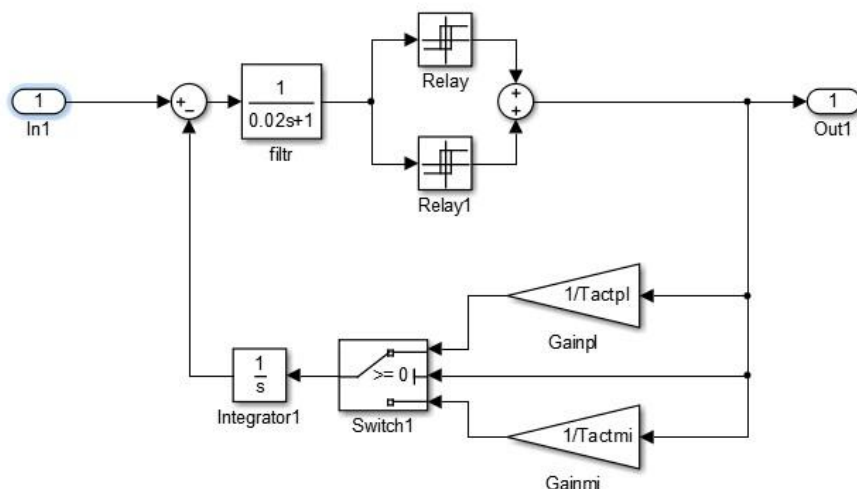


Рис. 6. Блок схема широтно импульсного модулятора

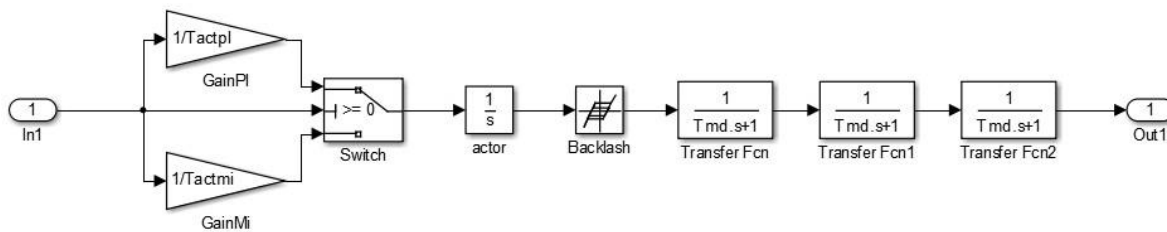


Рис. 7. Блок схема объекта с асимметричным люфтом

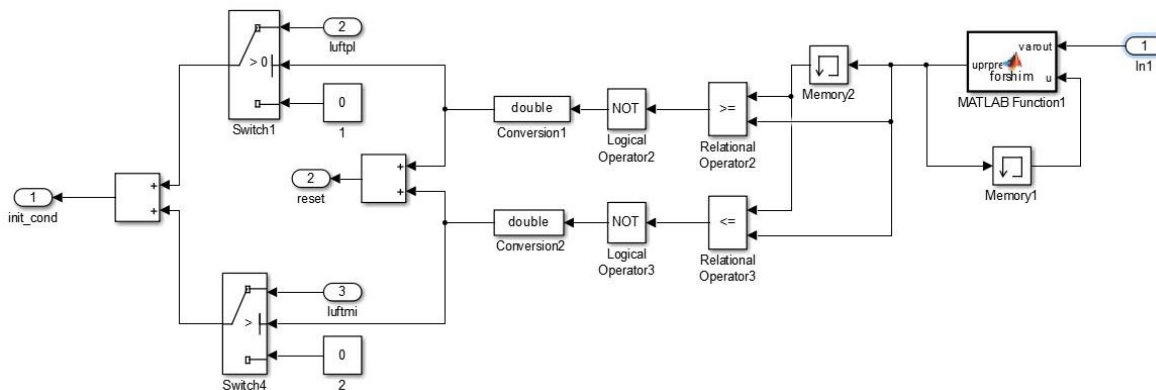


Рис. 8. Блок схема проверки люфта

Моделирование работы алгоритма с компенсацией асимметричного люфта проводится путем подачи единичного скачка на вход системы и исследования полученных переходных процессов. Для обычного регулятора без учета асимметричного люфта параметры $Tactpl$ и $Tactmi$ будут равны, в алгоритме ИПИДО эти параметры будут меняться в соответствии с направлением регулирования. Параметры моделирования приняты следующими: $Tmd = 5$ сек, величина люфта равна 0.2, на объект воздействует исполнительный механизм постоянной скорости с временами в прямом и обратном направлении $Tactpl$ и $Tactmi$ соответственно. Время моделирования 200 сек. Качество регулирования будем оценивать по трём различным критериям:

Среднеквадратичная ошибка:

$$J = \frac{1}{200} \int_0^{200} e^2(t) dt \quad (4)$$

Быстродействие t_n (время попадания регулируемой величины в 5% трубку)

Величина перерегулирования σ .

3. Моделирование работы импульсного регулятора ИПИДО

Приведем результаты моделирования работы импульсных регуляторов для регулирования объектов с люфтом.

Объект с симметричным люфтом $Tactpl = Tactmi = 10$ сек, ПИ регулятор без компенсации люфта рис. 9. Полная отработка задания не выполнена, ошибка составляет 0,015, переходной процесс затянутый. Критерии качества: $J = 0.09039$, $t_n = 82,39$ сек, $\sigma = 145\%$.

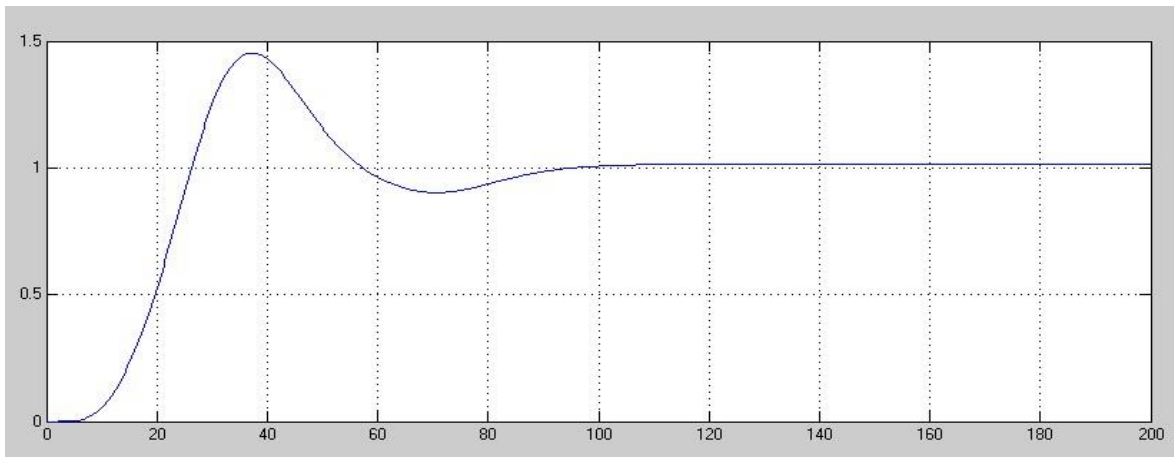


Рис. 9. Переходной процесс симметричный люфт компенсация отсутствует

Объект с симметричным люфтом $Tactpl = Tactmi = 10$ сек, ПИ регулятор с компенсацией симметричного люфта рис. 10. Полная отработка задания, ошибка по окончании переходного процесса отсутствует, быстродействие существенно выше, чем в предыдущем случае. Критерии качества $J = 0.09024$, $t_n = 53,49$ сек, $\sigma = 147\%$.

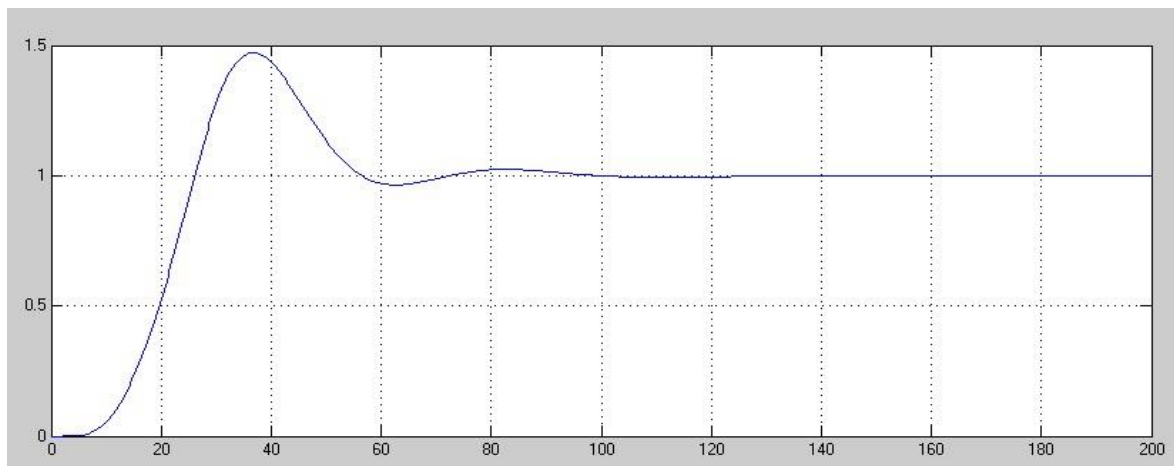


Рис. 10. Переходной процесс симметричный люфт с компенсацией

Объект с асимметричным люфтом $Tactpl = 10$, $Tactmi = 5$ сек, с компенсацией люфта обычным ПИ регулятором компенсация установлена по минимальному времени 5 сек. Рис. 11. Переходной процесс сильно затянут, полная отработка задания не выполнена, ошибка составляет $-0,025$. Критерии качества: $J = 0.08549$, $t_n = 91,54$ сек, перерегулирования нет.

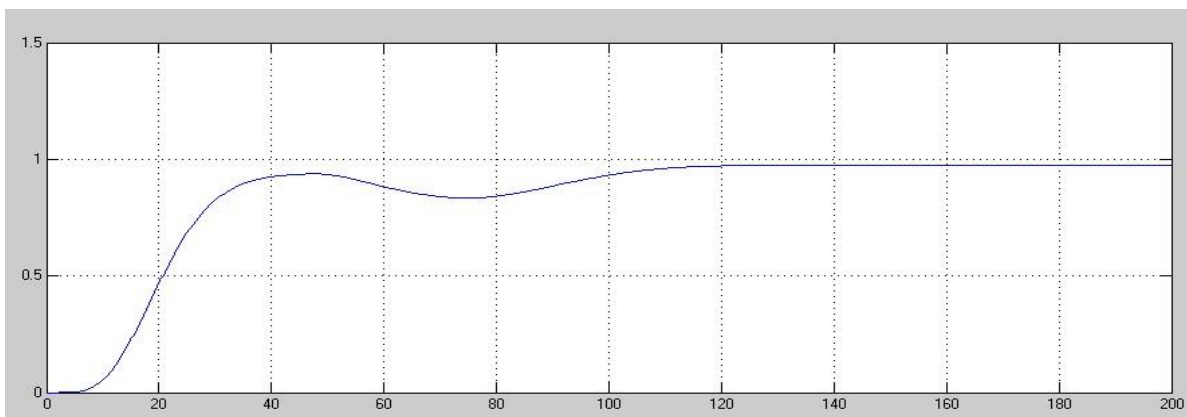


Рис. 11. Переходной процесс асимметричный люфт с компенсацией обычным регулятором с минимальным временем люфта

Объект с асимметричным люфтом $Tactpl = 10$, $Tactmi = 5$ сек, с компенсацией люфта обычным ПИ регулятором компенсация установлена по максимальному времени 10 сек. рис. 12. Установившийся режим отсутствует, средний уровень автоколебаний не соответствует заданию. Критерии качества: $J = 0.08706$, t_n отсутствует, $\sigma = 129\%$.

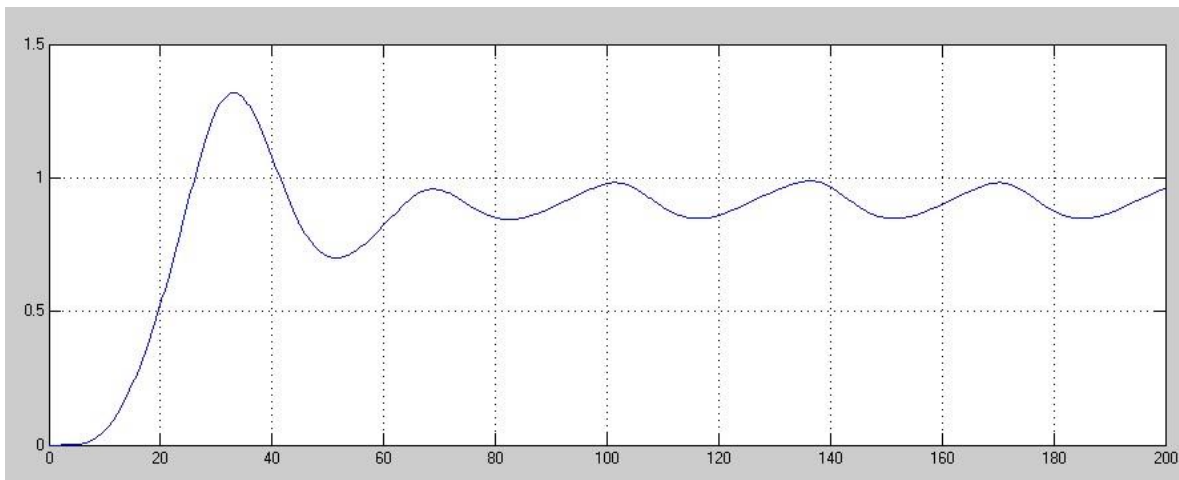


Рис. 12. Переходной процесс асимметричный люфт с компенсацией обычным регулятором с максимальным временем люфта

Объект с асимметричным люфтом $Tactpl = 10$, $Tactmi = 5$ сек, с компенсацией люфта регулятором ИПИДО с учётом разных времен люфта в прямом и обратном направлениях рис. 13. Переходной процесс с полной отработкой задания. Критерии качества: $J = 0.0897$, $t_n = 53,84$ сек, $\sigma = 146\%$.

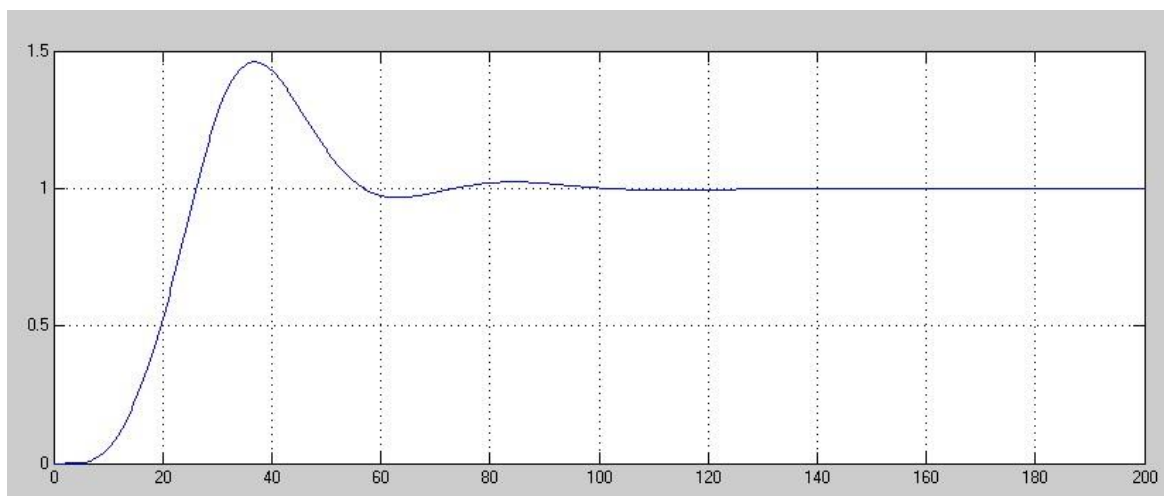


Рис. 13. Переходной процесс асимметричный люфт с компенсацией асимметричного люфта регулятором ИПИДО

4. Заключение

Анализ проведенного моделирования показывает, что использование алгоритмов регулирования с компенсацией люфта повышает качество регулирования в сравнении с регуляторами без компенсации рис. 9, рис. 10. Сравнение алгоритма ИПИДО с компенсацией асимметричного люфта в сравнении с регуляторами, компенсирующими симметричный люфт рис. 11, рис. 12, рис. 13 показывает, что при незначительной разнице в критерии среднеквадратической ошибки и перерегулирования, алгоритм ИПИДО значительно выигрывает в быстродействии и может поэтому эффективно использоваться для регулирования объектами с асимметричным люфтом.

Литература

1. Шубладзе А.М. Управление аperiodическими процессами импульсными регуляторами с автоматической компенсацией люфта / А.М. Шубладзе, С.И. Кузнецов, Н.М. Бобриков, И.К. Денисов, С.В. Гуляев, В.Р. Ольшванг, В.А. Малахов. Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 20-23.
2. Шубладзе А.М. Управление инерционными динамическими объектами ПИДмл регуляторами с автоматической компенсацией люфта / А.М. Шубладзе, С.В. Гуляев, А.А. Шубладзе, В.А. Малахов, В.Р. Ольшванг, С.И. Кузнецов, Н.М. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2009. – № 12. – С.31-34.
3. Gulyaev S., V.Vlasyuk. Pulse PID Controller IPIDO for Objects with Asymmetric Backlash // Proceedings of the 15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD). Moscow: IEEE, 2022.
4. Astrom K. PID controllers: theory, design, and tuning. Second edition / K. Astrom, Hagglund T. // ISA, 1995. – P. 343.
5. Ловчаков В.И. Нелинейные системы управления электроприводами и их аналитическое конструирование / В.И. Ловчаков, Б.В. Сухинин, В.В. Сурков. – Тула: ТулГУ, 1999. – 180 с.
6. Прядко И.Н. О локально явной модели люфта // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика – 2006. – №2. – С. 230-234. – URL: <https://rucont.ru/efd/521406> (дата обращения: 31.05.2023).