



НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МАСШТАБИРОВАНИЯ НА ОБЪЕКТАХ УПРАВЛЕНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ И НА ОБЪЕКТАХ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

В.Л. Бажанов, А.В. Кузьмин, Н.В. Кузьмин (СамГУПС)

Представлены результаты исследования возможностей метода масштабирования (ММ) и способов его практического использования для определения параметров настройки регуляторов в замкнутых контурах управления. На конкретных примерах демонстрируется применимость ММ при настройке регуляторов на объектах управления с запаздывающей реакцией на управляющие воздействия.

Ключевые слова: замкнутая система авторегулирования, параметры настройки регулятора, качество работы системы, метод масштабирования, набор эталонных систем, программа ММ-tuning.

Метод масштабирования (ММ) был впервые представлен в статье [1] в качестве эффективного инструмента для практической настройки регуляторов в замкнутых контурах управления. В работах [2, 3] на конкретных примерах демонстрировались важные достоинства метода:

- простота применения;
- высокая достоверность получаемых результатов (параметров настройки регуляторов);
- расширенная область применения (возможность настройки регуляторов на объектах управления с разнообразными свойствами).

Также рассматривались наиболее перспективные области практического применения ММ:

1. функция самонастройки, устанавливаемая в цифровые регуляторы [4];
2. специализированная компьютерная программа ММ-tuning, предназначенная для наладчиков систем авторегулирования [5].

В настоящей статье речь пойдет о применимости ММ для расчета параметров настройки ПИД-регуляторов на объектах управления с транспортным запаздыванием, а также на объектах высокого порядка. Идея о возможности такого использования ММ уже высказывалась ранее, и был изложен подход к ее реализации, сущность которого сводилась к следующему.

Для определения параметров настройки регулятора в некоторой замкнутой системе авторегулирования (далее "рабочей САР") с запаздывающим объектом управления ("рабочим ОУ") с помощью ММ необходимо:

- иметь заранее подготовленный набор эталонных САР¹ с объектами управления определенного типа, имеющими транспортное запаздывание разной величины;
- выбрать из располагаемого набора такую эталонную систему, в которой ОУ имеет кривую разгона, наилучшим образом совмещающую с кривой разгона рабочего объекта путем сжатия/растяжения (масштабирования) по координатным осям, и использовать данные этой системы в качестве основы для расчета искомых настроек регулятора.

¹Эталонная САР — это качественно настроенная система с известными данными об объекте управления и о параметрах настройки регулятора.

Для реализации указанного подхода и проверки его работоспособности потребовалась предварительная подготовка наборов эталонных САР с запаздывающими объектами, управляемыми ПИД-регуляторами. Были составлены два набора таких систем. Первый — для объекта второго порядка с самовывравниванием:

$$W(p) = \frac{e^{-t_z \cdot p}}{(32p + 1)(25p + 1)}, \quad (1)$$

у которого время запаздывания принимало следующие значения:

$$t_z = 5; 10; 15; 20; 30 \text{ (с)}. \quad (2)$$

Второй набор — для астатического объекта второго порядка:

$$W(p) = \frac{0,01 \cdot e^{-t_z \cdot p}}{p(10p + 1)}. \quad (3)$$

У этого объекта величина времени запаздывания устанавливалась на следующих значениях:

$$t_z = 2,5; 5; 7,5; 10 \text{ (с)}. \quad (4)$$

Настройки ПИД-регуляторов в эталонных САР на всех объектах управления (1-4) подбирались экспериментально. При этом ставились два требования:

1. добиться не колебательного (апериодического) характера переходных процессов в эталонных САР;
2. обеспечить величину перерегулирования (первый выбег) при смене задания регулятору на величину $\Delta X_{зд}$ не более 20% от $\Delta X_{зд}$.

Подобранные для эталонных САР настройки регуляторов проверялись на компьютерном имитаторе динамических объектов, работающем в РВ и имеющем АЦП и ЦАП для подключения стандартных регуляторов с типовыми сигналами внешних связей. Полученные данные об эталонных САР были введены в программу ММ-tuning с целью их многократного последующего использования. Возможность пополнения библиотеки эталонных САР программы специально предусмотрена ее разработчиком [4].

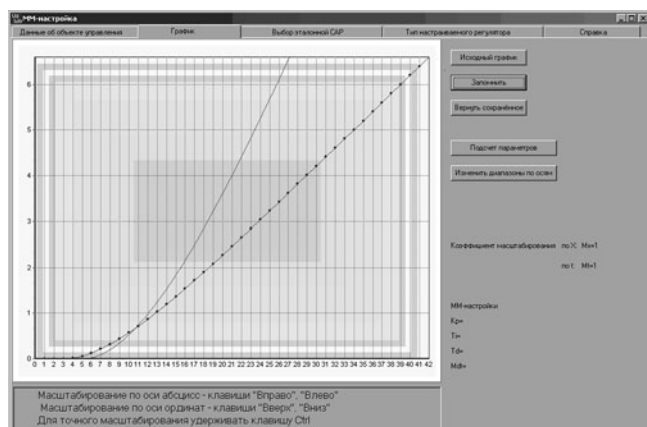


Рис. 1. Вид кривых разгона эталонного и рабочего объектов управления до масштабирования

Прежде чем приступить непосредственно к применению ММ для настройки ПИД-регулятора на запаздывающем объекте управления, полезно напомнить об одной особенности ММ, выявленной в ходе настройки регуляторов на объектах управления без запаздывания. Речь идет об условии, при соблюдении которого ММ фактически гарантирует получение достоверного результата [2]. Формулируется оно так: объекты управления в эталонной и рабочей системах должны быть одного типа, то есть должны иметь одинаковый порядок и степень астатизма. Отметим, что это условие не является строго обязательным, существуют примеры успешного применения ММ без учета этого условия. Однако его позитивное влияние на достоверность результата является вполне ощутимым. И поэтому лучше будет начать проверку пригодности ММ для настройки ПИД-регуляторов на запаздывающих объектах при соблюдении условия однотипности. Кроме того, если результат проверки окажется неудовлетворительным, не придется искать причину в пренебрежении полезной рекомендацией.

По этим соображениям в качестве первого примера настройки была выбрана система с запаздывающим объектом управления второго порядка с астатизмом 1-ой степени. Его передаточная функция имела вид:

$$W(p) = \frac{0,02 \cdot e^{-3p}}{p(6p+1)}. \quad (5)$$

Теперь задача обрела полную конкретность: определить с помощью ММ параметры настройки ПИД-регулятора на запаздывающем объекте (5). Проще всего это сделать с помощью программы ММ-tuning, которая позволяет получить желаемый результат буквально за два действия.

Цель первого действия — ввести в программу данные о кривой разгона рабочего ОУ (5). Запись этой кривой была сделана экспериментально в соответствии с общепринятыми правилами. Файлы с данными помещены в директорию (папку), где находится программа ММ-tuning. После запуска программы имена файлов были занесены в предусмотр-

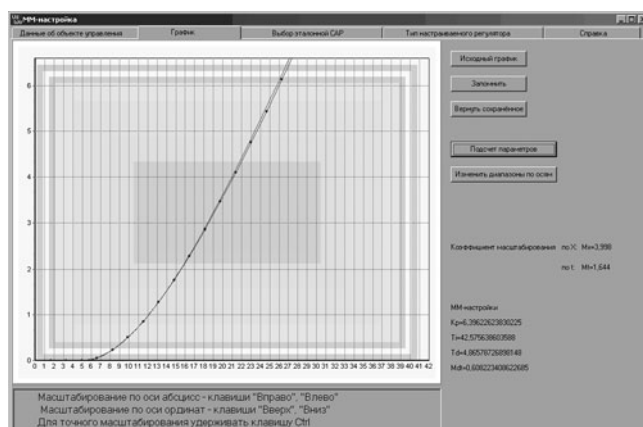


Рис. 2. Вид совмещенных в результате масштабирования кривых разгона эталонного и рабочего объектов управления

енные для этой цели строки, программа приняла данные, график кривой разгона отобразился на координатной плоскости.

Второе действие решает единственную, но самую ответственную в ММ задачу — достичь наиболее точного совпадения кривых разгона эталонного и рабочего объектов управления. От этого зависит достоверность получаемого результата. Чтобы добиться желаемого совпадения, пользователю ММ предоставляются два средства. Первое — это выбор эталонной САР, в которой ОУ имеет кривую разгона, подобную по виду кривой разгона рабочего объекта управления. Вторым средством является процедура масштабирования, позволяющая сжимать/растягивать кривую разгона рабочего ОУ относительно координат X и t путем подбора значений масштабных коэффициентов Mx и Mt .

В рассматриваемой задаче выбор делается из ранее подготовленного набора эталонных систем с запаздывающими объектами (3, 4), однотипными рабочему объекту (5). Библиотека эталонных САР в программе ММ-tuning организована таким образом, что при выделении мышью строки с данными конкретной эталонной системы пользователь видит все ее параметры, а также образцы переходных процессов в ней. Чтобы принять данные выделенной эталонной САР за основу для расчетов ММ-настроек, нужно нажать мышью на кнопку "Выбор". По этой команде программа выводит на координатную плоскость изображения кривых разгона рабочего и эталонного объектов управления совместно (рис. 1).

При нажатии клавиш управления курсором изменяется величина масштабных коэффициентов Mx и Mt . На мониторе отображается изменение формы кривой разгона рабочего объекта управления. Это позволяет контролировать точность ее совпадения с кривой разгона эталонного объекта. В рассматриваемом наборе эталонных САР (3, 4) отыскивается вариант с наилучшим совмещением кривых разгона. Таким вариантом оказалась система с объектом (3) и временем запаздывания $t_z = 5$ с. Результат достигнутого совпадения кривых разгона представлен на рис. 2.

Основная работа завершена. После щелчка мышью по кнопке "Подсчет параметров" программа рассчитывает и выводит на монитор искомые параметры настройки ПИД-регулятора (ММ-настройки: K_p – коэффициент передачи, T_i – время интегрирования, T_d – время дифференцирования). В рассматриваемом примере они получились следующими:

$$K_p = 6,4; T_i = 42,6 \text{ с}; T_d = 4,9 \text{ с}. \quad (6)$$

Наряду с настройками (6) программа выводит на экран значения масштабных коэффициентов, которые установились в момент наилучшего совмещения кривых разгона:

$$M_x = 3,998; M_t = 1,644. \quad (7)$$

Информация о коэффициентах позволяет сделать предварительные оценки ожидаемых показателей качества управления в настраиваемой системе, в частности, величины максимальной динамической ошибки управления и продолжительности времени регулирования. Оценка делается на основе образцов переходных процессов в выбранной эталонной системе, присутствующих в программе ММ-tuning, и представленных кривыми 1 на рис. 3.

Специфика ММ [2] состоит в том, что при корректном применении метода переходные процессы в настраиваемой и эталонной системах должны оказаться однотипными, линейно деформированными относительно друг друга по координатным осям пропорционально величине масштабных коэффициентов M_x и M_t (7).

На этом основании следует ожидать, что ПИД-регулятор с параметрами (6) на объекте (5) будет отрабатывать внешнее возмущение ДН с однократным отклонением регулируемой переменной от задания и с последующим плавным возвратом к заданному состоянию. Оценка ожидаемой максимальной ошибки управления может быть вычислена по соотношению:

$$DX_{\max}^{\text{эм}} = DX_{\max}^{\text{эм}} / M_x, \quad (8)$$

где $DX_{\max}^{\text{эм}}$ – максимальная динамическая ошибка управления в эталонной САР (подразумевается, что величина возмущения ДН в рабочей и эталонной системах одинакова).

Моменты максимумов динамической ошибки управления в эталонной $t_{\max}^{\text{эм}}$ и рабочей $t_{\max}$ системе также взаимосвязаны между собой через масштабный коэффициент M_t :

$$t_{\max} = t_{\max}^{\text{эм}} / M_t. \quad (9)$$

У выбранной эталонной САР процесс отработки внешнего возмущения $ДН = 20\%$ имеет максимальную ошибку управления, равную

$$DX_{\max}^{\text{эм}} = 11,6\%. \quad (10)$$

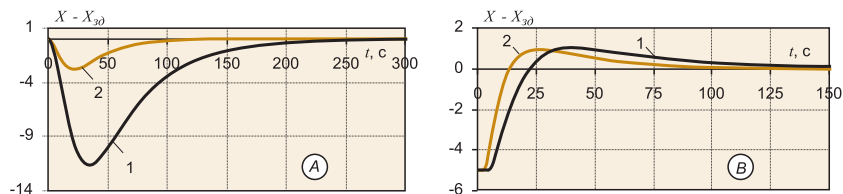


Рис. 3. Переходные процессы в эталонной (кривые 1) и рабочей (кривые 2) замкнутых САР

А – отработка внешнего возмущения $ДН=20\%$; В – увеличение задания регулятору на 5%

Она наблюдается в момент времени

$$t_{\max}^{\text{эм}} = 35,2 \text{ с}. \quad (11)$$

Тогда для настраиваемой системы предварительные оценки (8) и (9) при масштабных коэффициентах (7) дают следующий результат:

$$DX_{\max} = 2,9\%; t_{\max} = 21,4 \text{ с} \quad (12)$$

Эксперимент позволяет проверить достоверность предварительных оценок (12), а также узнать истинный характер процессов в рабочей САР при настройках ПИД-регулятора (6). Компьютерный имитатор объектов управления РВ дает возможность провести его оперативно и с необходимой точностью. Записанные в ходе эксперимента процессы представлены кривыми 2 на рис. 3. Вид кривых подтверждает подобие процессов в эталонной и рабочей системах авторегулирования, а также достоверность предварительных оценок (12). Это означает, что первый опыт применения ММ для определения настроек ПИД-регулятора на запаздывающем ОУ (5) оказался успешным.

Следует еще раз подчеркнуть, что составленный однажды и введенный в программу ММ-tuning набор эталонных САР с объектами (3, 4) позволяет оперативно определять параметры настройки ПИД-регуляторов на множестве объектов того же типа с разной величиной времени запаздывания. А если дополнить этот набор новыми образцами, то можно еще более расширить возможности программы ММ-tuning.

Именно такому расширению возможностей способствует другой подготовленный набор эталонных САР с запаздывающими объектами (1, 2). Ввод его в программу ММ-tuning позволяет надежно определять ММ-настройки ПИД-регуляторов на множестве запаздывающих объектов управления второго порядка, обладающих свойством самовывравнивания. В качестве доказательства можно привести пример настройки ПИД-регулятора на объекте управления с передаточной функцией следующего вида:

$$W(p) = \frac{1,2 \cdot e^{-6p}}{(13p+1)(8p+1)}. \quad (13)$$

Программа ММ-tuning использовалась так же, как в предыдущем примере. Кривая разгона рабочего объекта (13) снималась экспериментально, и данные о ней были введены в программу. Последующий выбор эталонной системы из набора (1, 2) показал, что наиболее точное совпадение кривых разгона рабоче-

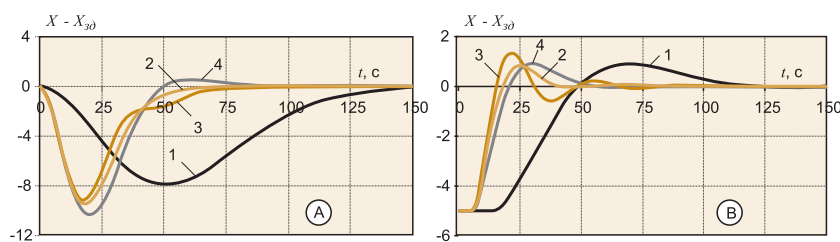


Рис. 4. Переходные процессы в эталонной (кривые 1) и рабочей (кривые 2, 3, 4) замкнутых САР.

А – отработка внешнего возмущения $DH=20\%$, В – увеличение задания регулятору на 5%

го и эталонного объектов достигается в варианте с запаздыванием $t_z = 15$ с. Оно наблюдалось при следующих значениях масштабных коэффициентов:

$$Mx = 0,825; Mt = 2,64. \quad (14)$$

Программа рассчитала и выдала искомые ММ-настройки ПИД-регулятора:

$$Kp = 1,48; Tu = 17,8 \text{ с}; Td = 4,54 \text{ с}. \quad (15)$$

На рис. 4 показаны переходные процессы в эталонной (кривая 1) и рабочей (кривая 2) системах авторегулирования при отработке внешнего возмущения (диаграмма А) и при изменении регулятором уставки задания (диаграмма В).

Подобие процессов в системах просматривается вполне определенно. Значения времени регулирования соотносятся пропорционально масштабному коэффициенту Mt (14), а динамические ошибки регулирования взаимосвязаны через коэффициент Mx (14). Это прямое подтверждение достоверности ММ-настроек (15), полученных с помощью ММ на запаздывающем объекте (13). Второй пример также оказался успешным.

О точности выбора эталонной системы

В процессе применения ММ наладчику приходится делать выбор эталонной системы. Естественно предположить возможность разного выбора, в том числе и не самого лучшего. Правомерен вопрос, насколько вероятен нерациональный выбор эталонной системы из имеющегося набора эталонных САР, а также каковы последствия такого выбора.

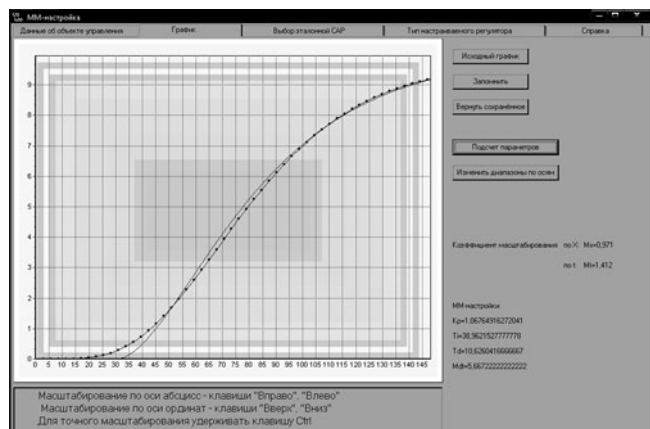


Рис. 5. Вид кривых разгона рабочего и эталонного объектов управления после масштабирования

Разработка программы ММ-tuning коренным образом облегчила процедуру выбора. И дело не только в экономии времени. Важную роль сыграл визуальный контроль совпадения кривых разгона эталонного и рабочего объектов управления при выполнении масштабирования. Показателем такой опыт. На курсах "Школы практической автоматики" 10 участников независимо друг от друга определяли с помощью

ММ параметры настройки ПИД-регулятора на объектах (5) и (13). Использовалась программа ММ-tuning. В итоге выяснилось, что выбор эталонных систем у всех участников оказался одинаковым. А полученные расчетные параметры настройки ПИД-регуляторов имели разброс в пределах ± 5 за счет небольших различий в значениях масштабных коэффициентов Mx и Mt .

Но даже при таком обнадеживающем результате нельзя исключать возможность ошибочного выбора эталонной системы, если он возложен на человека. Наиболее вероятной ошибкой будет выбор одной из двух эталонных систем, ближайших к правильному варианту.

Чтобы оценить последствия погрешности выбора, обратимся к примеру настройки ПИД-регулятора на объекте управления (13). Используемый набор эталонных систем построен на основе объекта (1) с разными значениями времени запаздывания (2). Правильный вариант выбора уже известен. Это эталонная система с объектом управления, имеющим запаздывание $t_z = 15$ с. Ближайшими к ней в наборе (1, 2) являются соседние системы с объектами, имеющими запаздывание 10 и 20 с.

При выборе этих эталонных систем точность визуального совмещения кривых разгона эталонных и рабочих объектов управления, достигаемая в ходе масштабирования, оказывается несколько ниже, чем у правильного варианта ($t_z = 15$ с). Лучшие результаты совмещения были получены при следующих значениях масштабных коэффициентов:

$$Mx = 0,745; \quad Mt = 2,158; \text{ (для } t_z = 10 \text{ с);} \quad (16)$$

$$Mx = 0,908; Mt = 3,097; \text{ (для } t_z = 20 \text{ с).} \quad (17)$$

Программа ММ-tuning вычислила соответствующие ММ-настройки ПИД-регулятора:

$$Kp = 1,71; Tu = 20,9 \text{ с}; Td = 5,1 \text{ с}; \text{ (для } t_z = 10 \text{ с);} \quad (18)$$

$$Kp = 1,27; Tu = 16,1 \text{ с}; Td = 3,1 \text{ с}; \text{ (для } t_z = 20 \text{ с).} \quad (19)$$

Достоверность полученных результатов (18, 19) проверялась экспериментами, в ходе которых велась запись переходных процессов в рабочей системе авторегулирования. Графики процессов представлены на рис. 4. Кривые 3 показывают, как работает система при настройках ПИД-регулятора (18), а кривые 4 – это процессы в САР при настройках регулятора (19). Сравнивая их с кривыми 1, легко заметить, что в обоих случаях процессы в рабочей системе несколько ут-

ратили подобие эталонным процессам. Это прямое следствие не самого удачного выбора эталонных систем и связанной с этим потерей точности совпадения кривых разгона при масштабировании. Следовательно, по сравнению с ММ-настройками (15) результаты (18, 19) обладают меньшей достоверностью. В то же время нужно признать, что при параметрах ПИД-регулятора (18, 19) настраиваемая система получается явно работоспособной. Более того, она обеспечивает вполне приемлемое качество управления.

Это говорит о том, что ММ не страдает обостренной чувствительностью к выбору эталонной системы, и для получения успешного результата не требуется идеального совмещения кривых разгона эталонного и рабочего объектов управления в ходе процедуры масштабирования. По-видимому, именно допустимость приближенного совмещения кривых разгона служит объяснением, почему условие однотипности объектов управления в эталонной и рабочей системах является не строгим требованием, а только полезной рекомендацией.

Опираясь на установленный факт, можно сделать следующий шаг. Известно, что для объектов управления высокого порядка характерна задержанная начальная реакция на изменение входного (управляющего) воздействия. Внешне она выглядит как запаздывание. Естественнo предположить, что исследуемый способ применения ММ на запаздывающих объектах может оказаться пригодным и для определения настроек регуляторов на объектах высоких порядков.

Наличие наборов эталонных САР с запаздывающими объектами второго порядка (1, 2) и (3, 4) позволяет проверить на практике сделанное предположение. Пусть требуется найти с помощью ММ параметры настройки ПИД-регулятора в замкнутой САР с объектом управления шестого порядка:

$$W(p) = \frac{1}{[(14p+1)(13p+1)(10p+1)] \cdot [(9p+1)(7p+1)(6p+1)]}. \quad (20)$$

Это объект с самовывравниванием. Соответственно для выбора эталонной системы лучше подойдет набор с запаздывающими объектами (1, 2), также обладающими самовывравниванием.

Значительное отличие порядков рабочего и эталонных объектов управления заведомо предопределяет нарушение условия однотипности. Очевидно, что добиться той точности совпадения кривых разгона, которая достижима при масштабировании однотипных объектов, будет невозможно. Это должно снизить достоверность получаемых ММ-настроек. Факт сам по себе негативный, означающий определенную утрату контроля над качеством получаемого

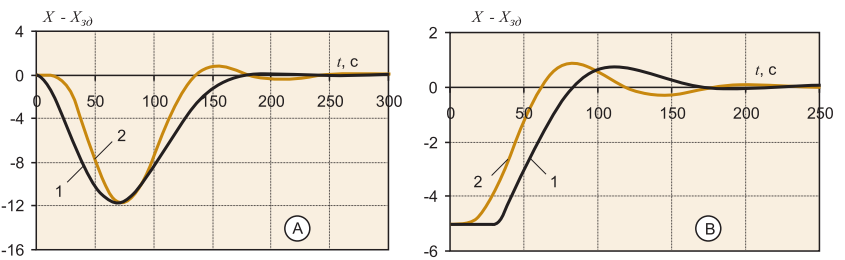


Рис. 6. Переходные процессы в эталонной (кривые 1) и рабочей (кривые 2) замкнутых САР.

А – отработка внешнего возмущения $DH=20\%$, В – увеличение задания регулятору на 5%

результата. Тем не менее есть основания надеяться, что найденные параметры ПИД-регулятора окажутся вполне пригодными для использования, способными обеспечить нормальную работу настраиваемой САР.

Кривая разгона объекта управления (20) была записана экспериментально и введена в программу ММ-tuning. Наиболее точное совмещение кривых разгона рабочего и эталонного объектов получилось в варианте со значением запаздывания $t_z = 30$ с. Вид совмещенных в результате масштабирования кривых представлен на рис. 5. По сравнению с предыдущими примерами достигнута точность совмещения оказалась несколько ниже.

После команды "Подсчет параметров" программа рассчитала и вывела на монитор искомые ММ-настройки регулятора:

$$Kp = 1,07; Tu = 39 \text{ с}; Td = 10,6 \text{ с}. \quad (21)$$

Для оценки достоверности результата (21) объект управления (20) был воспроизведен на компьютерном имитаторе объектов РВ и к нему подключен ПИД-регулятор с ММ-настройками (21). Записаны переходные процессы в системе при возмущении на грузкой ДН и при смене задания регулятору. Результаты отображены на рис. 6 (кривые 2). Для сравнения здесь же представлены аналогичные процессы в эталонной САР (кривые 1).

Как и предполагалось, характер процессов в системах оказался разным. В рабочей САР явно просматривается колебательность. Так проявила себя пониженная точность масштабирования (несовпадение кривых разгона), обусловленная разнотипностью объектов. Но, несмотря на это, полученные ММ-настройки регулятора (21) вновь смогли обеспечить работоспособность системы авторегулирования и вполне приемлемое качество управления. Рассмотренный пример является прямым подтверждением того, что с помощью ММ можно определять настройки ПИД-регуляторов на объектах управления высоких порядков, используя имеющийся набор эталонных САР с запаздывающими объектами меньшего порядка.

Несомненно, это позитивная особенность метода масштабирования. Тем не менее, не стоит забывать, что наиболее высокую достоверность определения

настроек регуляторов ММ обеспечивает при соблюдении условия однотипности объектов управления в рабочей и эталонной системе. И, как отмечалось в работах [2, 3, 4], это условие не является чрезмерно обременительным.

В заключение следует сказать, что в статье рассмотрена только часть особенностей ММ, полезных для тех, кто занимается практической настройкой систем авторегулирования. На сайте НПП "ПОРА-USWO" www.uswo.lgg.ru планируется выделить специальный раздел, посвященный ММ, в котором будет представлена наиболее полная информация для желающих освоить метод масштабирования — эффективный инструмент для оперативной и качественной настройки регуляторов на широком классе объектов управления.

Список литературы

1. *Бажанов В.Л.* Метод масштабирования для определения параметров настройки регуляторов в замкнутых САР // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 12.
2. *Бажанов В.Л.* Возможности и специфика метода масштабирования для настройки регуляторов в замкнутых САР // Там же. 2004. № 5.
3. *Бажанов В.Л.* Метод масштабирования — эффективный инструмент для практической настройки регуляторов в замкнутых САР // Там же. 2006. № 6.
4. *Бажанов В.Л.* Функция самонастройки по методу масштабирования для цифровых регуляторов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. № 12.
5. *Бажанов В.Л., Вайшнарас А.В.* Программа "ММ-настройка" для определения параметров ПИД-регуляторов по методу масштабирования // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6.

Бажанов Владимир Леонидович — канд. техн. наук, доцент;

Кузьмин Александр Валентинович и Кузьмин Николай Валентинович — студенты-дипломники кафедры "Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте" Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС).

Контактный телефон (927) 760-28-84. E-mail: uswo@samtel.ru; tklinkov@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ФОРМОВАНИЯ ЛЕНТЫ СТЕКЛА В ФЛОАТ-ВАННЕ

Д.И. Левковский, Р.И. Макаров (Владимирский государственный университет)

Описывается методика построения подсистемы поддержки принятия решений для управления одной из стадий ТП производства листового стекла — формованием ленты стекла на расплаве олова в флоат-ванне.

Ключевые слова: подсистема поддержки принятия решений, математическая модель, нейронная сеть, технологический процесс, флоат-ванна, стекло листовое.

Конкурентная среда в условиях рынка обязывает руководителей стекольных производств уделять большое внимание проблемам качества. Между качеством и эффективностью производства существует прямая зависимость. Процесс производства листового стекла флоат-способом относится к крупнотоннажным производствам, характеризуется многостадийностью и непрерывностью во времени.

Рассмотрим подсистему поддержки принятия решений по управлению флоат-ванной. На этой стадии ТП производства листового стекла жидкая стекломасса из выработочной части ванной печи по каналу подается на поверхность расплава олова. Стекломасса растекается по поверхности расплава равномерным слоем до равновесной толщины, постепенно охлаждается до затвердевания и выводится из ванны расплава в печь отжига тянущими усилиями роликового конвейера. При этом ее температура постепенно понижается: если на сливном лотке она составляет около 1050°C, то в начале зоны растекания — ~1000°C, а в конце флоат-ванны — ~600°C [1].

Технологический режим требует строгого контроля температуры, от этого зависит качество изготавливаемой продукции. Для управления температурным режимом формования в своде флоат-ванны расположены электрические нагреватели. Главная цель созданной подсистемы управления — миними-

зировать затраты электроэнергии на нагрев ленты стекла при сохранении высокого качества вырабатываемой продукции.

Для стабильного ведения технологического процесса необходимы постоянный контроль и регулирование температуры, состояния газов защитной атмосферы, параметров ленты стекла и ее положения. Межгосударственный стандарт ГОСТ 111-2001 "Стекло листовое. Технические условия" регламентирует свойства стекла, определяющие качество формования: разнотолщинность и оптические искажения.

Процесс формования ленты стекла на расплаве олова недостаточно формализован, поэтому создание адекватных моделей, в особенности выбор их структуры, представляет сложную задачу. Возможно несколько подходов и алгоритмов, позволяющих по экспериментальным данным создать модели, пригодные для решения задач прогнозирования и управления:

- метод перебора вариантов;
- принцип самоорганизации;
- дискриминация и селекция моделей;
- дисперсионный подход для оценки нелинейности моделей и весовой функции объекта;
- анализ разностей в планах эксперимента для выбора степени полинома;
- последовательная графоаналитическая аппроксимация частных откликов с последующей композицией;