

СООБЩЕНИЯ

УДК 681.513

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ МАЯТНИКА В СРЕДЕ MATLAB*

К.М. БОБОБЕКОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: kurbon_111@mail.ru

Исследуется схема моделирования однопараметрического и двухпараметрического регуляторов. Для получения выходного сигнала воспользуемся несколькими блоками из Simulink block library. Приведены более компактные варианты структурных схем системы с однопараметрическим и двухпараметрическим регуляторами, представленными в одном и двух блоках. Приведена реализация двухпараметрического регулятора с использованием блоков Scope, Clock, To Workspace. Эти блоки позволяют регистрировать результаты моделирования в удобном для анализа виде. Подробно указана последовательность необходимых действий для настройки этих блоков. Приведен упрощенный вариант моделирования с использованием блока Scope. Также дан более сложный вариант исследования переходных процессов системы с использованием команды $\text{poly}(t, y)$, которая позволяет более гибко использовать возможности пакета моделирования Matlab.

Ключевые слова: объект управления, перевернутый маятник, угол отклонения, система управления, двухпараметрический регулятор, статический режим, реализация схемы управления, моделирование в среде Matlab

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-3-115-130

ВВЕДЕНИЕ

В работе [10] приведены расчеты параметров так называемого однопараметрического регулятора $W_R(s)$, результаты моделирования системы управления (рис. 1, а), включающей в себя объект $W_{ob}(s)$, и расчеты параметров двухпараметрического регулятора $\{W_{R1}(s), W_{R2}(s)\}$ (рис. 1, б).

* Статья получена 25 августа 2016 г.

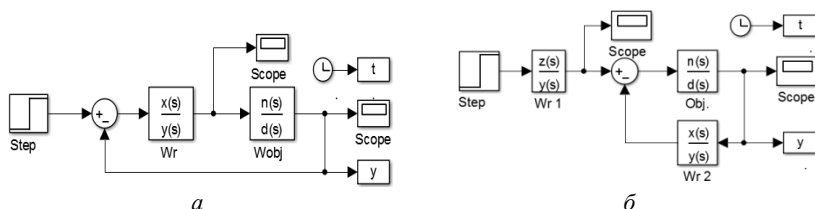


Рис. 1. Структурная схема системы управления с однопараметрическим (а) и двухпараметрическим регуляторами (б)

В вышеуказанной работе [10] не приведены «детали» вычислений и особенности моделирования. В данной работе приведена информация, отсутствующая в [10].

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО И ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРОВ

При моделировании однопараметрического регулятора для наглядного представления графиков переходных процессов и регистрации численного значения выходного сигнала используем блок **Scope** (рис. 1), блок **To Workspace** из группы **Sinks** (регистрация выходных сигналов) и блок **Clock** из группы **Sources** (генераторы входных сигналов). Эти блоки вводим для удобства работы с графическим материалом. Далее необходимо ввести имя переменной (по умолчанию **simout**): в нашем случае заменяем **simout** на **t**. Далее будем подобное действие записывать так: **simout** → **t**. Формат выбираем в виде массива **Array** и нажимаем кнопку **Ок** (или на клавиатуре **Enter**) и соединяем блоки **Clock** и **To Workspace**. Потом копируем блок **To Workspace** при помощи **Ctrl+C** и **Ctrl+V** (или нажимая правую кнопку мыши) и перемещаем в нужное место, отпускаем кнопку. Название блока автоматически изменяется: **t** → **t1** (рис. 1, а). Откроем блок, заменим **t1** → **y** и нажимаем **Ок**, соединяем **y** с выходом системы. Для рис. 1, б и структурной схемы рис. 2 осуществляем аналогичные действия. Коэффициент усиления $1/0.04$ необходим для коррекции статического режима.

На рис. 3, а показана структурная схема с однопараметрическим регулятором в виде одного блока, содержащего объект и регулятор, а на рис. 3, б – структурная схема с двухпараметрическим регулятором (объект и регулятор – отдельные блоки).

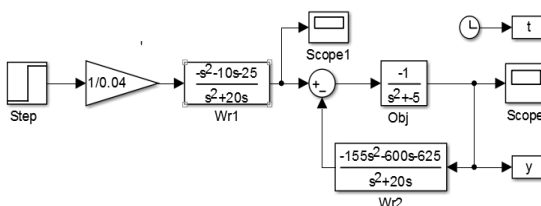


Рис. 2. Схема с двухпараметрическим регулятором, заданном в численном виде

Реализация двухпараметрического регулятора в блочном виде показана на рис. 3, б.

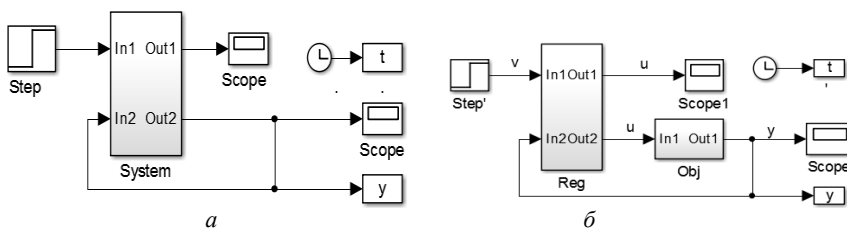


Рис. 3. Структурная схема системы управления с однопараметрическим (один блок, а) и двухпараметрическим (два блока, б) регуляторами

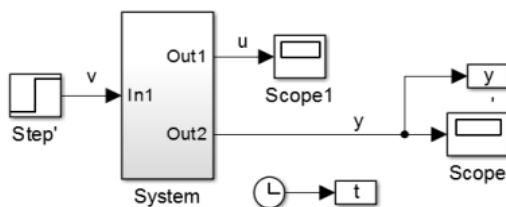


Рис. 4. Структурная схема системы управления с двухпараметрическим регулятором (регулятор и объект в одном блоке)

Более компактная структурная схема системы с двухпараметрическим регулятором показана на рис. 4, в котором блоки с двухпараметрическим регулятором и объект находятся в одном блоке.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА В СРЕДЕ MATLAB – SIMULINK

Если исходить из структуры регулятора, приведенного на рис. 2, для реализации регулятора необходимо использовать четыре интегратора. Однако это будет не минимальная реализация. Минимальная реализация двухпараметрического регулятора показана на рис. 5, что предложено в [10].

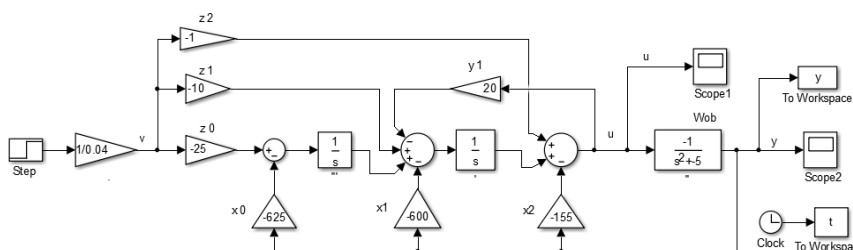


Рис. 5. Реализация двухпараметрического регулятора

Здесь также введены блоки **Clock**, **To Workspace**.

3. АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ С ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Для получения переходных процессов запускаем систему (см. рис. 4). Выходной сигнал системы наблюдаем при помощи блока **Scope** (рис. 6). Этот же сигнал можно получить по-другому, а именно: в командном окне (Command Window) вводим

```
>>plot(t, y),
```

и после нажатия кнопки **Enter** появляется график выходного сигнала системы (рис. 7). Для нанесения надписей на графиках и изменения цвета, фона и так далее необходимо выполнить ряд действий (см. приложение).

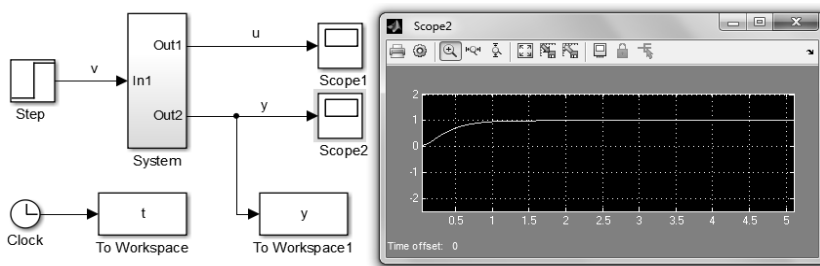


Рис. 6. Упрощенный вариант регистрации переходного процесса

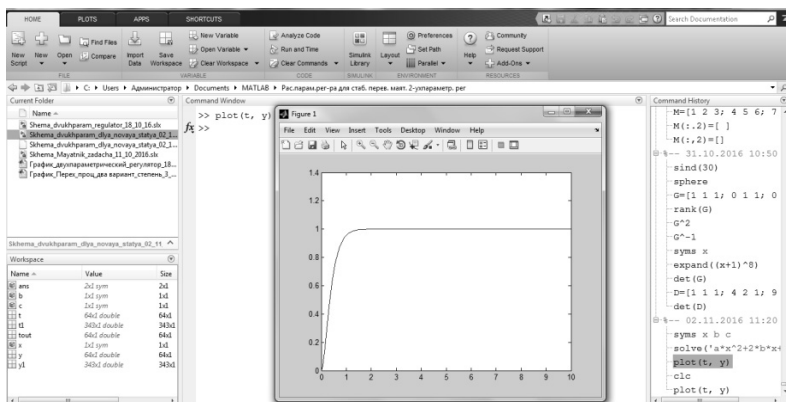


Рис. 7. Второй вариант регистрации переходного процесса

Переходный процесс системы с двухпараметрическим регулятором со всеми необходимыми надписями в окончательном виде приведен на рис. 8.

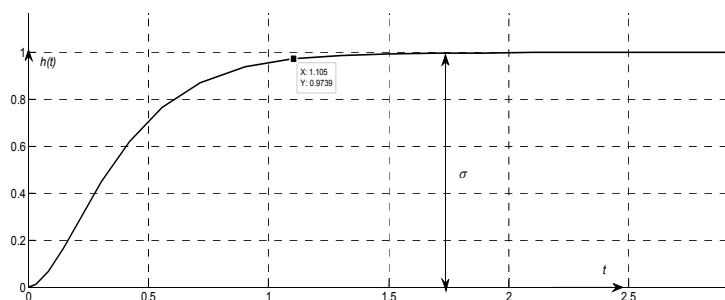


Рис. 8. Переходный процесс в системе с двухпараметрическим регулятором

В отличие от систем стабилизации положения перевернутого маятника, приведенных в работах [1, 2, 11, 14], здесь, как можем видеть, перерегулирование отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная методика моделирования двухпараметрического регулятора позволяет реализовать систему управления линеаризованной моделью перевернутого маятника. Показатели переходных процессов существенно лучше по сравнению с однопараметрическим регулятором. Показано, каким образом

реализуется регулятор минимального порядка. В приложении приведены рекомендации по использованию вспомогательных средств пакета Matlab для нанесения необходимой информации на графике переходных процессов, что может существенно сократить время исследования и оформления полученных результатов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

При работе с графиками переходных процессов в системах автоматического управления необходимо задавать соответствующие шкалы по осям координат, менять цвет и толщину линий, делать соответствующие надписи и т. д.

В простейших случаях при моделировании для получения выходного сигнала используют блок **Scope**. Можно также получить графики с использованием блоков **To Workspace** (рис. П1) и **Clock** из группы **Sources** (генераторы входных сигналов). Эти блоки перемещаем нажатием левой кнопки мыши и ставим в соответствующее место в схеме моделирования (рис. П1).

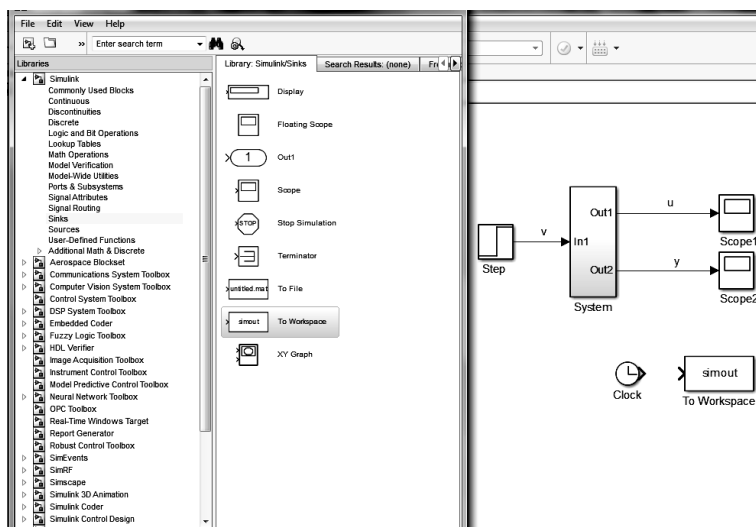


Рис. П1. Выбор блока **To workspace** из Library\ Simulink \ Sinks

Далее необходимо настроить блок **To Workspace** – ввести имя переменной (по умолчанию **simout**). В нашем случае заменяем **simout** на **t** и выбираем формат **Array** (рис. П2). После настройки нажимаем кнопку **Ok** или **Enter**.

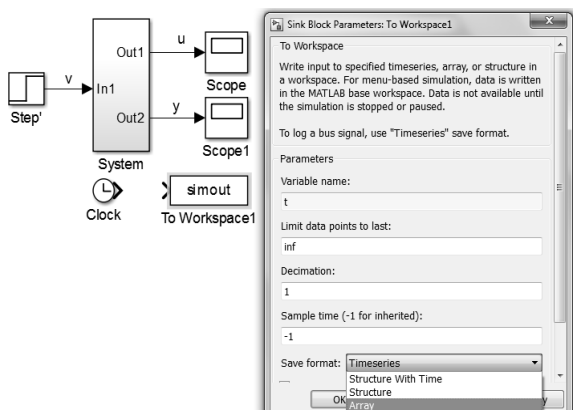


Рис. 112. Настройка блока To Workspace

Далее копируется блок **To Workspace** (Ctrl + C Ctrl + V). Получили блок **t1**, в котором **t1** заменяем на **y**.

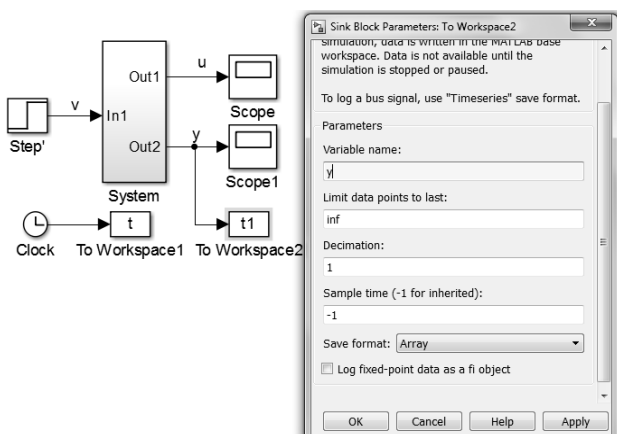



Рис. 113. Внесение наименований блоков

Для каких либо изменений на графике (см. рис. 7) необходимо активировать мышью, для чего нажимаем кнопку  (рис. 7 вверху слева) и левую кнопку мыши два раза. При этом курсор должен находиться в области графика. После чего откроется график (рис. П4).

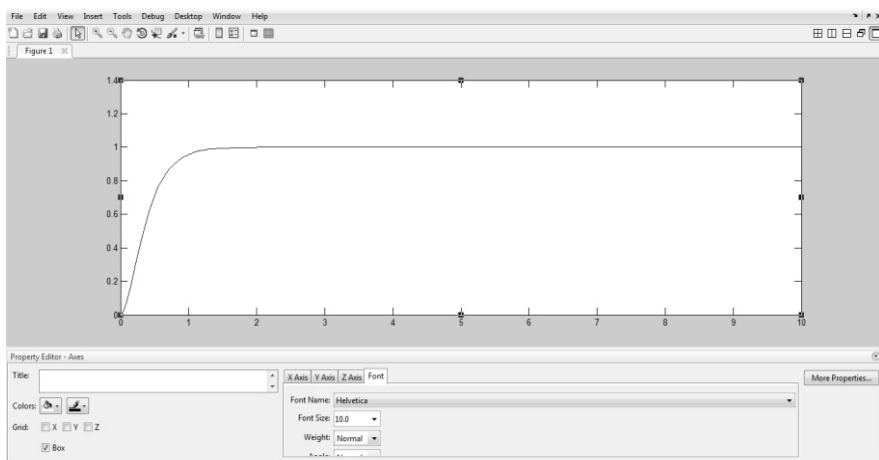


Рис. П4. Переходный процесс с двухпараметрическим регулятором:
второй вариант

Для нанесения сетки ставится курсор в нижней части рис. П5.

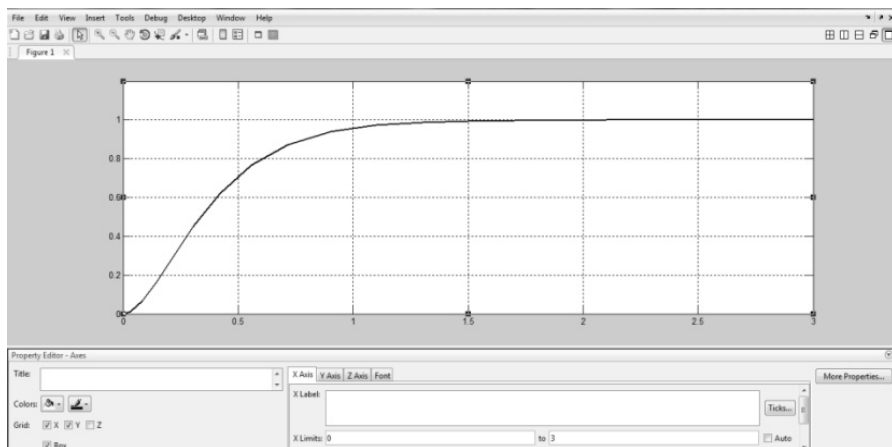


Рис. П5. Переходный процесс с нанесенной сеткой

При нажатии левой кнопки мыши, расположенной на линии, в нижней части графика появятся вспомогательные кнопки, позволяющие модифицировать линию (график). Например, можно изменить толщину линии (рис. П6), вид линии (Styleline), цвет линии и т. д.

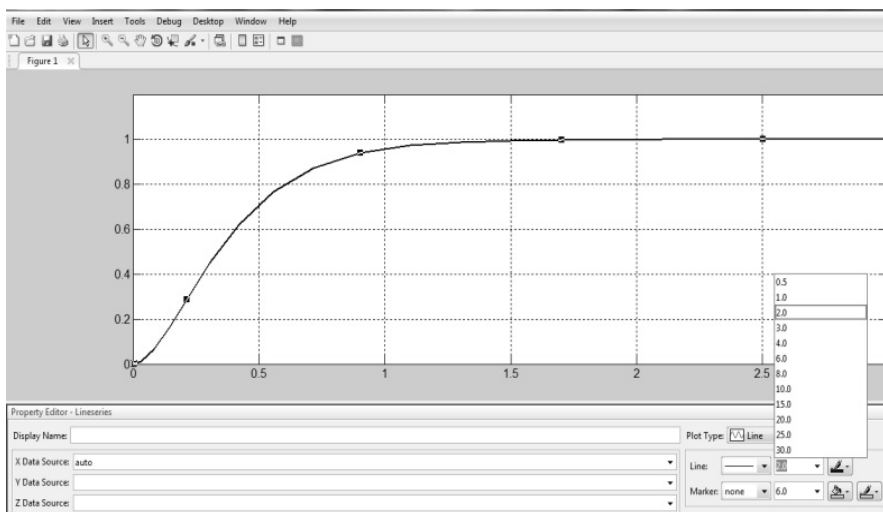


Рис. П6. Изменение характеристик линии графика

График можно сделать более наглядным, если изменить фон графика (рис. П7) или выбрать подходящий шрифт (рис. П8).

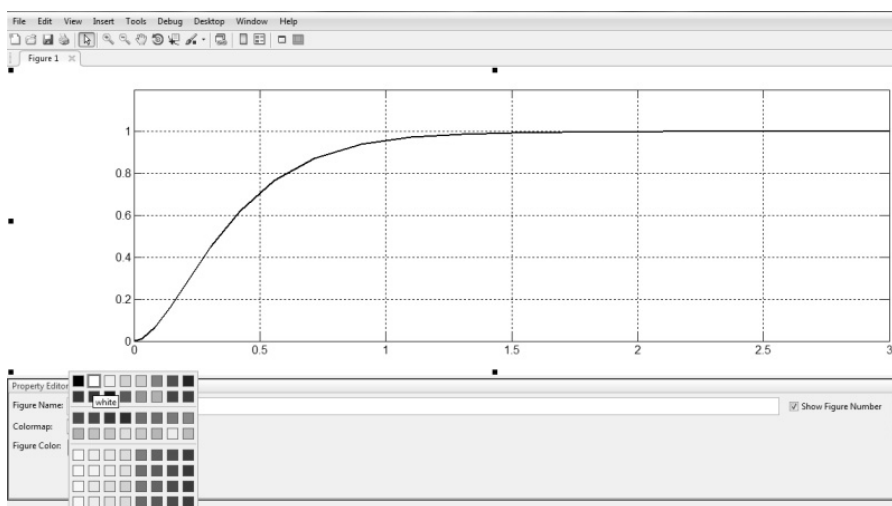


Рис. П7. Изменение фона графика

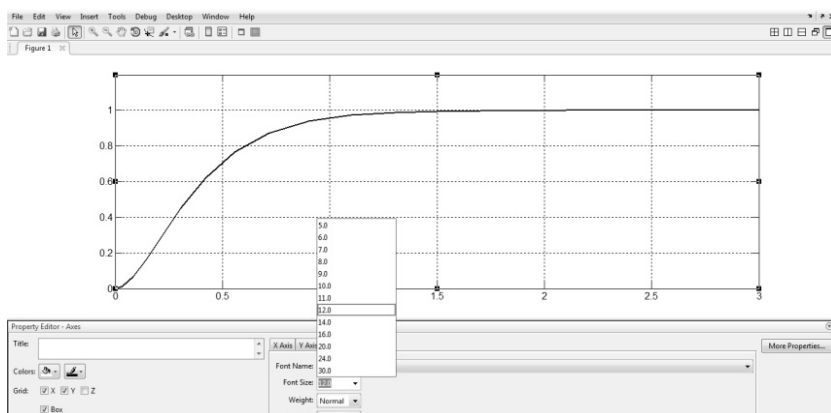


Рис. П8. Изменение шрифтов на графике

В рисунок можно вставить надписи, значки в виде стрелок, двухсторонние стрелки, название координатных осей, линии и т. д. Например для того чтобы вставить надпись, выбираем **\Insert \ TextBox** (рис. П9).

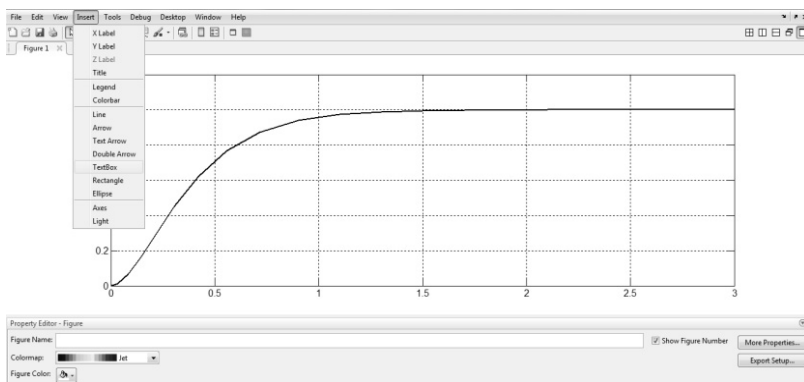


Рис. П9. Надписи на графике

При вставке надписи появляется рамка, внутри которой находится надпись. Для удаления рамки наводим курсор на надпись и нажимаем правую кнопку мыши, выбираем **\Line Style \ none** или в нижней части рис. П10 находим кнопку **Edge Color**, нажимаем левую кнопку мыши, выбираем **No color** (рис. П10). Также можно сделать надпись жирным и / или курсивным шрифтом. Можно изменить фон надписи, размер шрифта, название шрифта и т. д.

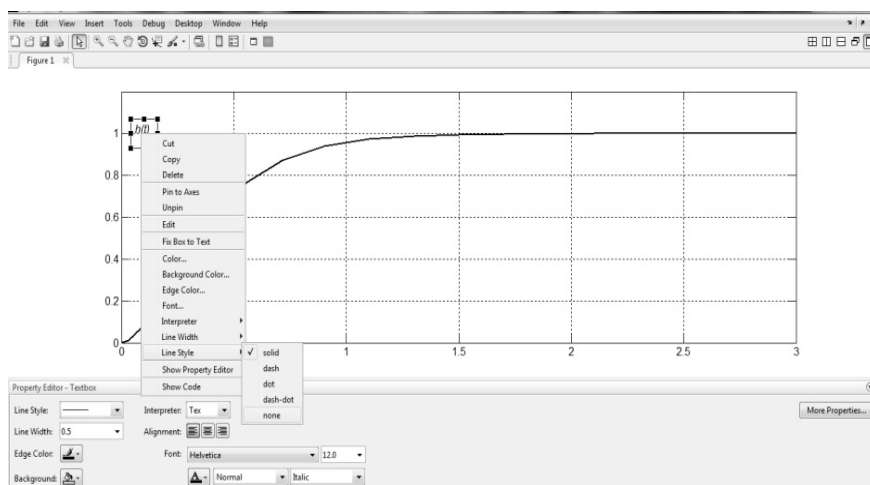


Рис. П10. Нанесение надписей: удаление рамки

Пояснения, указанные для рис. П9, можно также отнести и к рис. П11.

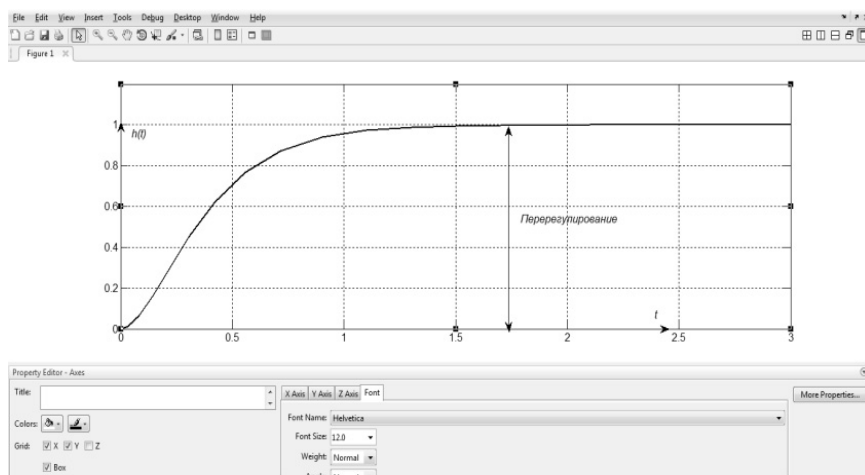


Рис. П11. Нанесение стрелок с надписями

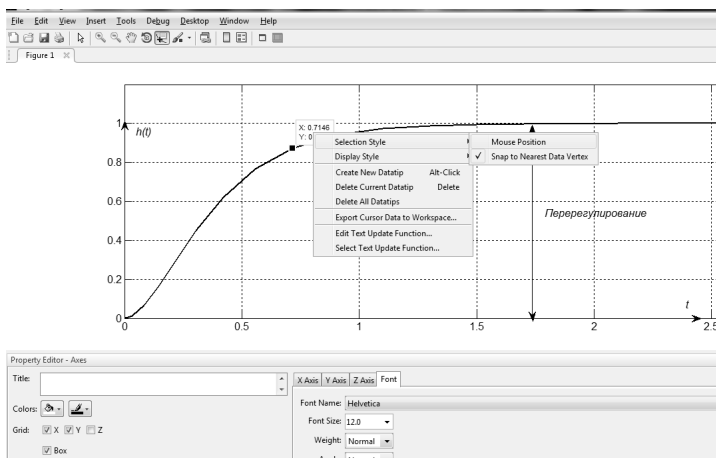



Рис. П12. Определение координат выделенной точки

Для точки графика можно указать координаты x и y (рис. П12). Для этого в верхней части графика нажимается кнопка  при помощи левой кнопки мыши и потом нажимаем левую кнопку мыши в области линии графика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воевода А.А., Шоба Е.В. Управление перевернутым маятником // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 2 (68). – С. 3–14.
2. Бобобеков К.М. Модель перевернутого маятника: частные случаи // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3 (81). – С. 21–42.
3. Бобобеков К.М., Воевода А.А. Полиномиальный метод синтеза ПИ(Д)-регулятора для неминимально фазового объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 4 (82). – С. 7–20.
4. Воевода А.А., Вороной В.В. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.
5. Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез регуляторов пониженного порядка методом дифференцирования характеристического полинома // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 1 (63). – С. 3–12.
6. Шоба Е.В., Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–22.

7. Воевода А.А. Стабилизация двухмассовой системы: модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 1 (38). – С. 195–198.
8. Вороной В.В. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.
9. Chen C.T. Linear system theory and design. – 3rd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.
10. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. The parameters determination of the inverted pendulum model in the automatic control system // XIII международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП–2016, Новосибирск, 3–6 октября 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 1, ч. 3. – С. 180–182.
11. Воевода А.А., Бобобеков К.М. Активная идентификация параметров модели перевернутого маятника по углу при подаче на вход синусоидальных сигналов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 2 (84). – С. 21–37.
12. Mehra R.K. Optimal input for linear system identification // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1974. – Vol. 19, N 3. – P. 192–200.
13. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с. – ISBN 5-9221-0379-2.
14. Шоба Е.В. Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.
15. Ljung L. System identification: theory for the user. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999. – 315 p.
16. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. The active identification of parameters for the unstable object // XI Международный форум по стратегическим технологиям, IFOST–2016, Новосибирск, 1–3 июня 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 594–596.

Бобобеков Курбонмурод Мулломиракович, специалист по технологиям машиностроения, 2008–2013 гг. – кафедра «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» механико-технологического факультета Таджикского технического университета (ТТУ) им. акад. М.С. Осими. С 2013 по 2015 г. ассистент Таджикского технического университета. С 2015 г. аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. Имеет 5 публикаций. E-mail: kurbon_111@mail.ru

On the peculiarities of realization the two-parameter regulator of stabilization the position pendulum in environment MATLAB*

K.M. Bobobekov

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, the post-graduate student of Department "Automatics". E-mail: kurbon_111@mail.ru

Is investigated the simulation scheme the one-parameter and the two-parameter regulators. For obtaining the output use a few blocks from the Simulink block library. Presented a more compact the options of the structural diagram of a system with one-parameter and the two-parameter regulators, represented in one and two blocks. Is shown implementation of the two-parameter regulator using the Scope blocks, Clock, To Workspace. These blocks allow you to register the simulation results in a convenient form for analysis. Detail indicated a sequence required of actions to configure these blocks. Is shown a simplified option simulation using the Scope block. Also given to a more complex option of research of transitional system processes by using $\text{poly}(t, y)$, which allows more flexible use of the possibilities of the simulation package Matlab.

Keywords: control object, inverted pendulum, displacement angle, control system, two parameter regulator, static mode, realization control scheme, simulation in Matlab environment

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-3-115-130

REFERENCES

1. Voevoda A.A., Shoba E.B. Upravlenie perevernutym mayatnikom [About model inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 2 (68), pp. 3–14.
2. Bobobekov K.M. Model' perevernutogo mayatnika: chastnye sluchai [The Model of the inverted pendulum: special cases]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 21–42.
3. Bobobekov K.M., Voevoda A.A. Polinomial'nyi metod sinteza PI(D)-regulyatora dlya neminimal'no fazovogo ob'ekta [Polynomial method synthesis of PI(D) regulator for non-minimum-phase object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 7–20.
4. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov zadannoi struktury [Polynomial method for calculating multi-channel controllers of a given structure]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo*

* Received 25 August 2016.

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 2 (51), pp. 214–218.

5. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Modal'nyi sintez regulyatorov ponizhennogo poryadka metodom differentsirovaniya kharakteristicheskogo polinoma [Modal design of reduced order controllers by method of differentiation of the characteristic polynomial]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 1 (63), pp. 3–12.

6. Shoba E.V., Voevoda A.A., Voronoi V.V. Modal'nyi sintez mnogokanal'nogo regulyatora ponizhennogo poryadka s ispol'zovaniem "obratnoi" proizvodnoi [Modal synthesis of multi-channel low-order controller using the "reverse" derivative principle for three-mass system]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (46), pp. 15–22.

7. Voevoda A.A. Stabilizatsiya dvukhmassovoi sistemy: modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya [Stabilisation of two-mass system by a modal method of synthesis with polynomial factorization]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 1 (38), pp. 195–198.

8. Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand. tekhn. nauk [A polynomial method for calculating the multi-channel controllers low order. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.

9. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 3rd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

10. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. The parameters determination of the inverted pendulum model in the automatic control system. *XIII mezh-dunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy elektronnogo priboroostroeniya" APEP-2016* [Proceedings of the XIII International Conference "Actual problems of electronic instrument engineering", (APEIE-2016)], Novosibirsk, 3–6 October 2016, vol. 1, pt. 3, pp. 180–182.

11. Voevoda A.A., Bobobekov K.M. Aktivnaya identifikatsiya parametrov modeli perevernutogo mayatnika po uglu pri podache na vkhod sinusoidal'nykh signalov [Active identification of the inverted pendulum model data on angle in applied to the input sinusoidal signal]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (84), pp. 21–37.

12. Mehra R.K. Optimal input for linear system identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, vol. 19, no. 3, pp. 192–200.

13. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 1. *Lineinye sistemy* [The theory of automatic control. Vol. 1. Linear systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 288 p. ISBN 5-9221-0379-2.
14. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand.tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multi-channel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.
15. Ljung L. *System identification: theory for the user*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 1999. 315 p.
16. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Troshina G.V. [The active identification of parameters for the unstable object]. *XI Mezhdunarodnyi forum po strategicheskim tekhnologiyam, IFOST-2016* [The 11th International Forum on Strategic Technology IFOST-2016], Novosibirsk, 1–3 June 2016, pp. 594–596.