

Синтез регулятора для многомерных объектов второго порядка с запаздыванием методом численной ОПТИМИЗАЦИИ

А.И. Уберт, В.Г. Шахтинейдер

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Проектирование регуляторов для одноканальных систем в двадцать первом веке уже не является сложной проблемой. Существующие методы их расчета путем численной оптимизации позволяют относительно просто решить существенную часть задач, решению которых ранее посвящалось достаточно много научных статей, учебников, монографий. Некоторая часть таких задач осталась не решенной, что связано со специфическими особенностями моделей объекта. Объекты, имеющие много входов и много выходов, называемые многоканальными или многомерными, а в англоязычной литературе *MIMO – Many Inputs Many Outputs* – до сих пор представляют определенную проблему. Такие задачи также решены в некоторых случаях методом численной оптимизации, но систематического изложения методик решения этой задачи не хватает в литературе. Данная статья предпринимает попытку систематизировать методику решения этой задачи на одном примере, который представляет достаточную сложность вследствие того, что в матричной передаточной функции объекта каждым элементом является звено второго порядка с элементом запаздывания. Применение метода численной оптимизации напрямую, без каких-либо предварительных аналитических действий, не привело к желаемому результату, поэтому использованы некоторые специальные методы, которые рекомендованы при решении подобных задач.

Ключевые слова: математическое моделирование, регуляторы, контроллеры, ПИД, многоканальные системы, *MIMO*, устойчивость, точность, управление в технических системах, автоматика, кибернетика, численное моделирование, оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

Серия учебников и научных статей в области численной оптимизации замкнутых динамических систем дает достаточный инструментарий для решения большинства простых задач по расчету регуляторов [1–17]. В них предложены целевые функции и их модификации, также предложены структуры для численной оптимизации регуляторов, рассмотрены специальные методы для обеспечения устойчивости и высокого качества управления. Однако, простое применение набора предложенных в этих публикациях правил, не привело к успеху при решении такой задачи, как полностью раздельное (автономное) управление объектом второго порядка, в котором каждый из элементов матричной передаточной функции является последовательным соединением фильтра второго порядка и звена чистого запаздывания. Исследованы возможности применения целевых (стоимостных) функций в виде суммы модулей ошибки по каждому из каналов, умноженному на время с начала переходного процесса. Также было использовано введение в целевую функцию детекторов роста ошибки, которые вычисляют положительную часть произведения ошибки на его производную. Введены поправки на многомерный случай. Эксперимент показал, что этих методов недостаточно для успешного решения поставленной задачи.

В данной статье использованы некоторые дополнительные меры для успешного решения поставленной задачи. Эти меры могут пополнить арсенал инструментария для численной оптимизации регуляторов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим объект второго порядка размерности 2×2 с запаздыванием.

Это означает, что его математическая модель может быть записана в виде матрицы:

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{bmatrix} = [w_{ij}(s)], i, j \in [1, 2].$$

Здесь

$$w_{ij}(s) = \frac{k_{ij}}{1 + \tau_{ij}s + Q_{ij}s^2} e^{-\tau s}.$$

В данных уравнениях использованы традиционные обозначения $W(s)$ – передаточная функция в области преобразований Лапласа, s – аргумент этой функции, k_{ij} , T_{ij} , Q_{ij} , τ_{ij} – постоянные коэффициенты, первый из которых не имеет единиц измерения, остальные измеряются в единицах времени. Указанные коэффициенты могут составлять благоприятное сочетание, или неблагоприятное. В частности, если все k_{ij} в случае $i \neq j$ равны нулю, то матричная передаточная функция вырождается в диагональную матрицу, в этом случае многоканальный объект фактически ведет себя как два отдельных объекта, не влияющих друг на друга, поэтому задача проектирования многоканального регулятора вырождается в задачу проектирования соответствующего количества одноканальных регуляторов.

Соответственно, если указанные элементы не равны нулю, но пренебрежимо малы в сравнении с диагональными элементами, то задача не вырождается в несколько одноканальных, но близка к такому вырождению, то есть проектирование многоканального регулятора целесообразно, то может оказаться, что его передаточная функция также близка к диагональной матрице.

Например, зададим коэффициенты параметров модели объекта значениями из Таблицы 1.

Таблица 1.

Таблица параметров в модели объекта

	11	12	21	22
k	2	4	5	6
T	3	2	2	4
Q^2	1	2	1	6
τ	0,3	0,1	0,2	0,4

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель объекта легко строится в виде набора стандартных функций, как показано на *Рис. 1* в правой его части.

Модель регулятора представляет собой матрицу, каждым элементом которой является

ПИД-регулятор, модель такого регулятора в программе *VisSim* показана в правой части *Рис. 1*. Регулятор соединяется с объектом последовательно, при этом выходные сигналы регулятора обозначены буквами u_1 и u_2 , выходные сигналы объекта обозначены символами x_1 и x_2 , входные задания на объект обозначены символами ступенчатого скачка (слева на *Рис. 1*), также выходы объекта вычитаются из задания, в результате вычитания получаются сигналы ошибки e_1 и e_2 , которые являются входными сигналами регулятора.

Для более простого обозначения на рисунках модели объекта и регулятора могут быть объединены в составные блоки, называемые, соответственно, «Regulator 2x2» и «Object 2x2». На *Рис. 2* показано такое упрощенное изображение проекта системы, упрощение позволило разместить в том же формате также и осциллограф с несколькими входами для отображения сигналов, получаемых в системе при моделировании.

Для того, чтобы осуществить моделирование, необходимо задать значения коэффициентов регулятора, а для отыскания лучших значений их необходимо вычислить методом численной оптимизации.

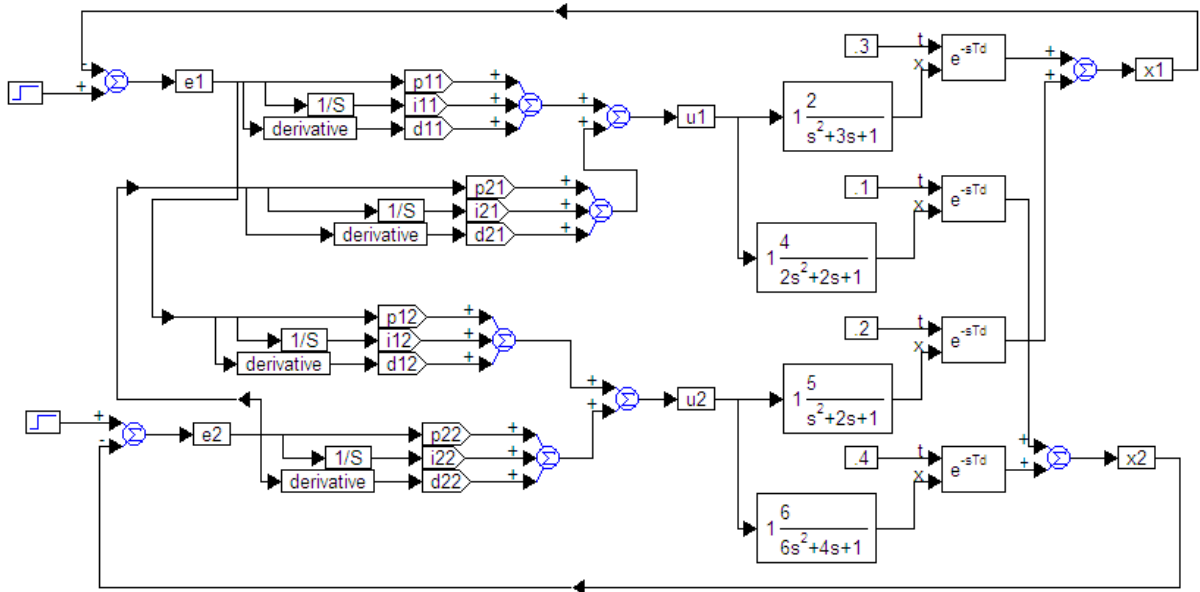


Рис. 1. Проект для расчета регулятора размерностью 2x2 в программе VisSim

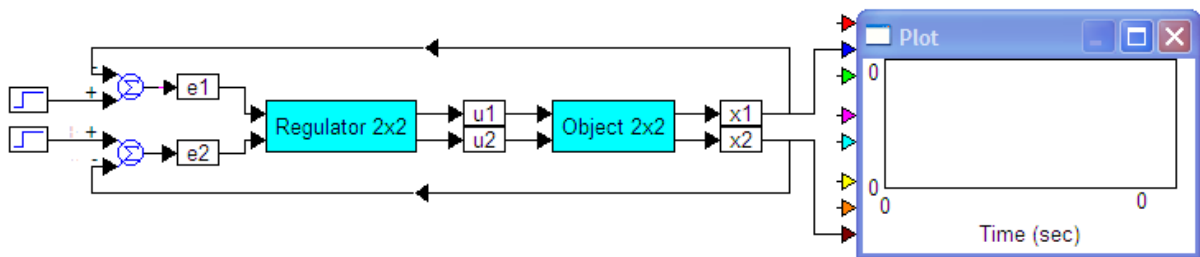


Рис. 2. Проект с упрощенным представлением за счет объединения элементов в блоки

С этой целью необходимо задать начальные значения этих коэффициентов и ввести их в блок оптимизации, как показано на Рис. 3. Эти элементы в дальнейшем вводятся в составной блок под названием «*Optimization Unit*». Также

следует вычислить стоимостную функцию, для этих целей следует ввести блоки, вычисляющие стоимостную функцию, а их выход необходимо ввести в блок «*Cost*», как показано на Рис. 4.

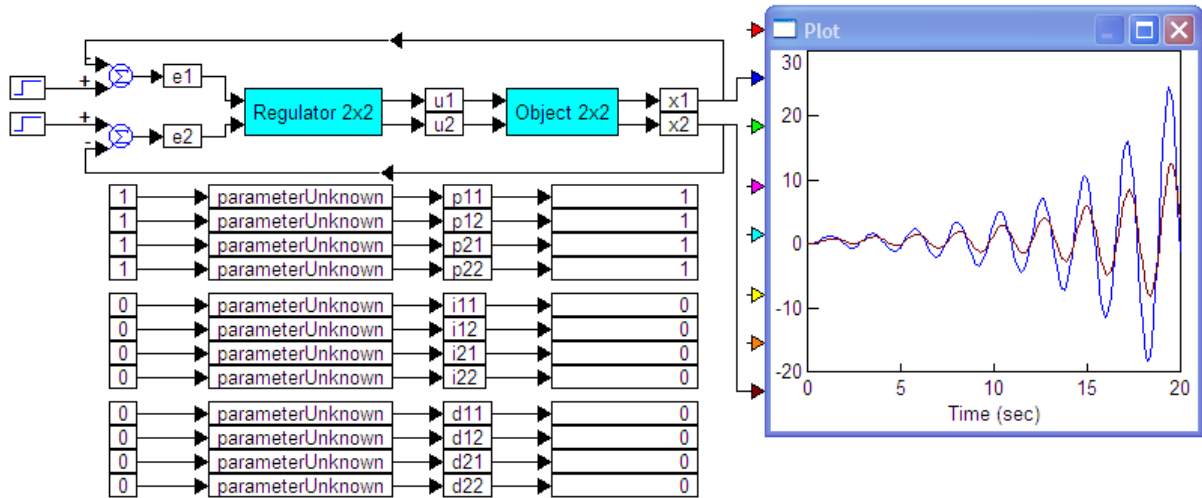


Рис. 3. Проект с добавлением блоков, необходимых для оптимизации, позволяющих задать начальные значения оптимизируемых параметров

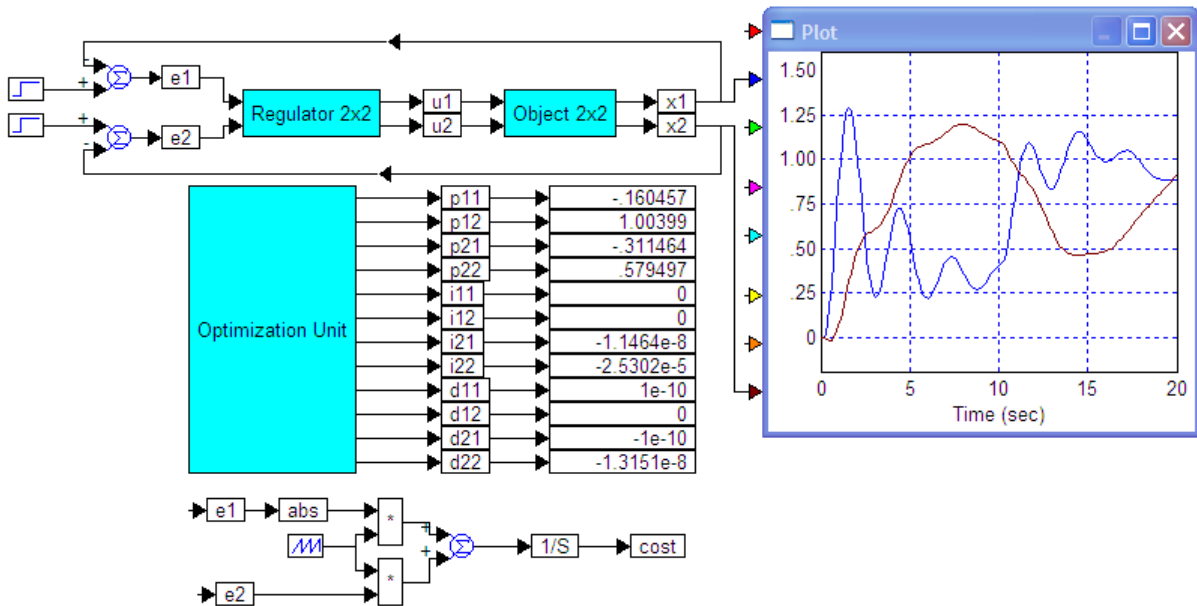


Рис. 4. Проект с добавлением блоков, необходимых вычисления и использования стоимостной функции, а также результат оптимизации

Как видно из Рис. 4, стоимостная функция равна сумме произведений моделей ошибок от каждого канала, на время с начала переходного процесса (которое формирует блок линейно нарастающего сигнала). Согласно рекомендациям, приведенным в работах [1–17], задание формируется как два ступенчатых единичных скачка, причем, второй скачок отстает по времени на половину времени моделирования, то есть при времени моделирования, равном 20 с, как на Рис. 4, задержка ступенчатого сигнала по второму каналу составляет 10 с. Также генератор линейно

нарастающего сигнала формирует два зубца, длительность каждого зубца составляет также 10 с. Результаты отыскания коэффициентов регулятора, которые минимизируют стоимостную функцию при данных условиях моделирования, даны в индикаторах в центре Рис. 4. Целью управления является достижение таких процессов на выходе, которые были бы как можно ближе к процессам на входе. Эта цель, разумеется, не достигнута при первой попытке оптимизации, что следует из графиков в окне осциллографа на Рис. 4. Можно предположить, что время моделирования выбрано слишком

маленьким, поэтому попробуем увеличить его, а также задержку сигнала по второму каналу и период пилообразного сигнала в вычислителе стоимостной функции вдвое, как показано на Рис. 5. Система, похоже, стала устойчивой, но этого недостаточно, поскольку отклонения от предписываемых значений превышают 100%, а

также установившиеся значений выходных величин далеки от требуемых значений, этот результат нельзя назвать эффективным управлением. Результаты дальнейшего увеличения интервалов вдвое показаны далее на Рис. 6 и Рис. 7, видно, что и в этом случае результаты неудовлетворительные.

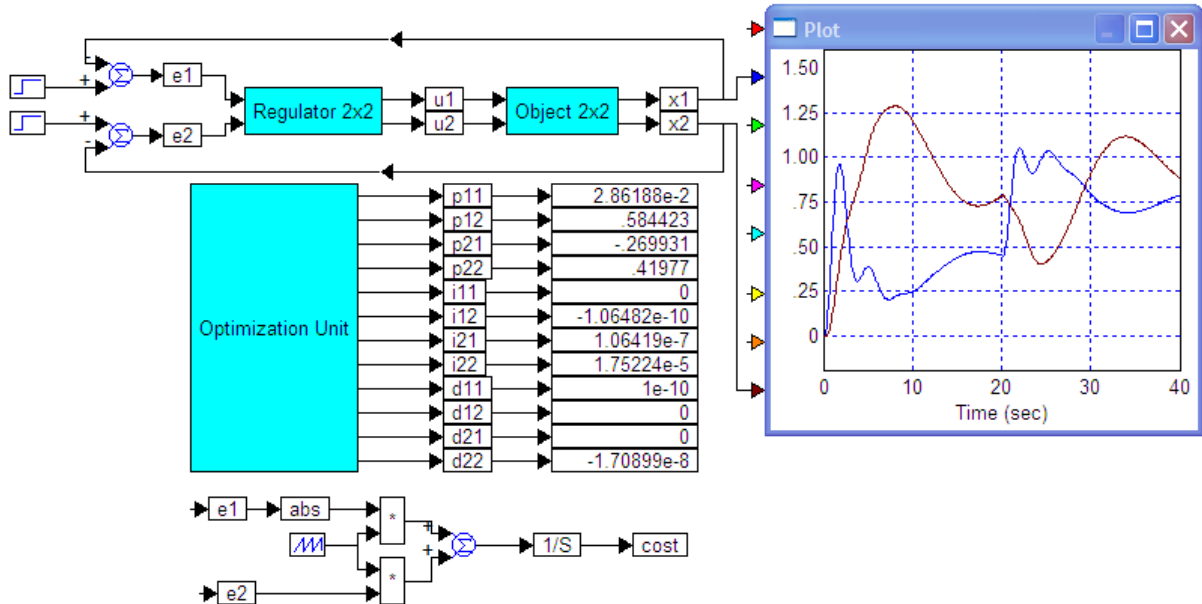


Рис. 5. Результат оптимизации после увеличения времени и задержки второго сигнала вдвое (время моделирования равно 40 с)

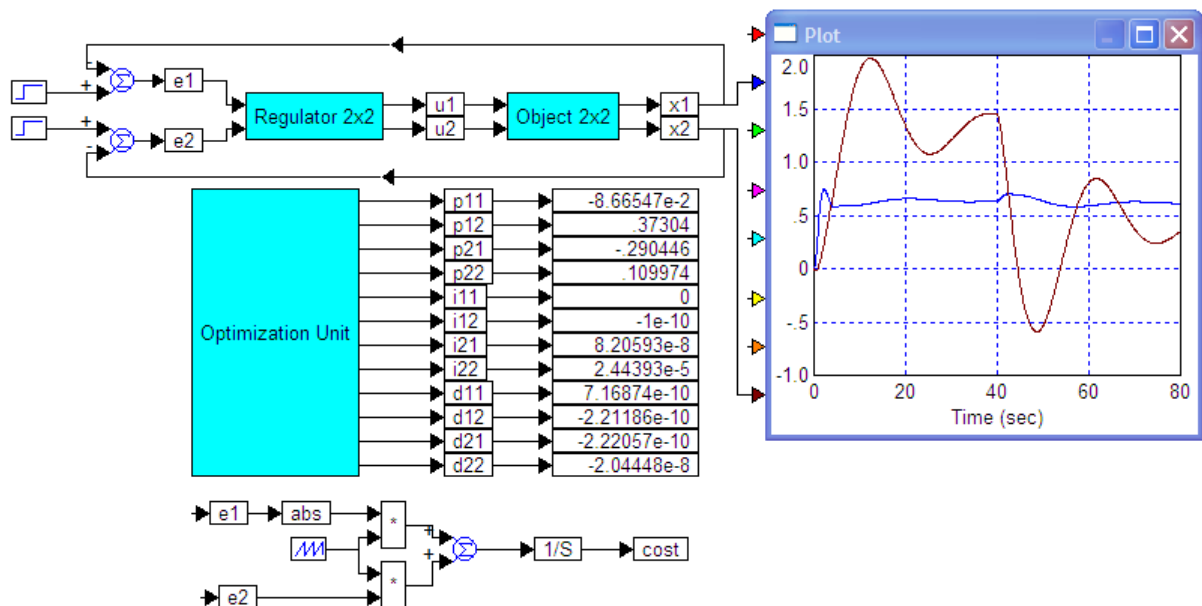


Рис. 6. Результат оптимизации после увеличения времени и задержки второго сигнала вдвое (время моделирования равно 80 с)

Одна из рекомендаций, предлагаемых в цикле работ [1–17], состоит в дополнении вычислителя стоимостной функции детектором роста ошибки. Этот детектор состоит из вычислителя произведения ошибки на ее производную и ограничителя, выделяющего только положительную часть результата. Моделирование показало, что и этой модификации недостаточно.

Другая рекомендация для многоканальных систем состоит в замене нумерации каналов в том случае, если передаточные функции в главной диагонали явно меньше передаточных функций в других элементах, для двухканального случая это две другие передаточные функции, расположенные в неглавной диагонали. Критерием доминирования являются два фактора:

передаточная функция доминирует, если одновременно коэффициент ее больше другой, с которой она сравнивается, а постоянные времени меньше, причем, следует обращать наибольшее внимание на постоянную времени при первой степени параметра s . В данном случае можно

явно увидеть из *Таблицы 1*, что неглавная диагональ доминирует, поэтому замена нумерации выходов целесообразна. Результат оптимизации после этих двух модификаций условий оптимизации показан на *Рис. 8*.

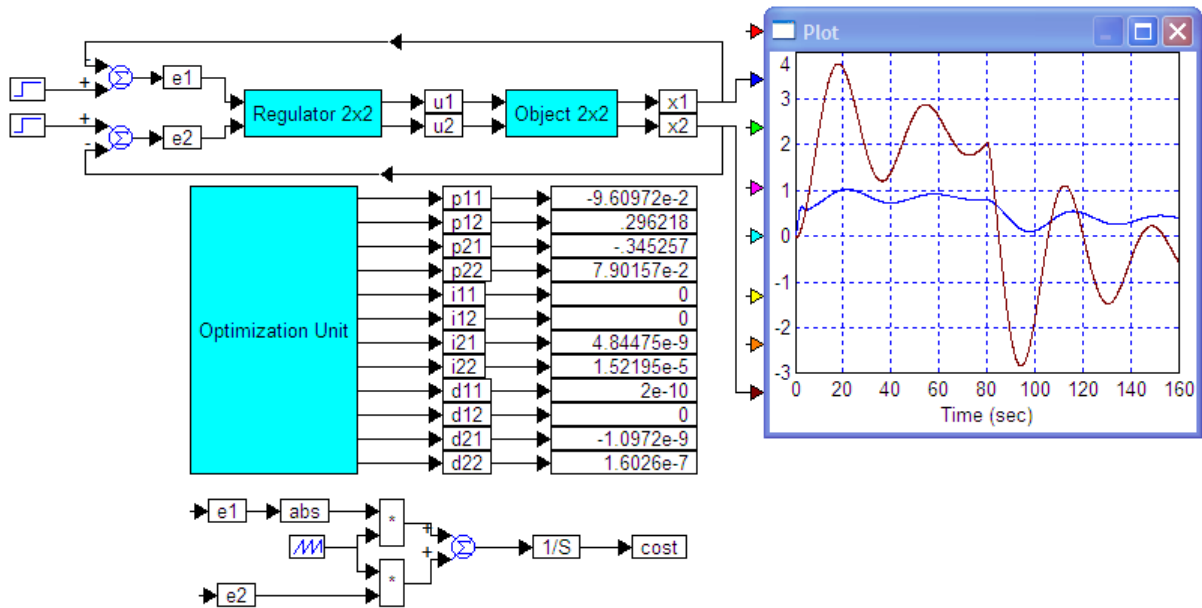


Рис. 7. Результат оптимизации после увеличения времени и задержки второго сигнала вдвое (время моделирования равно 160 с)

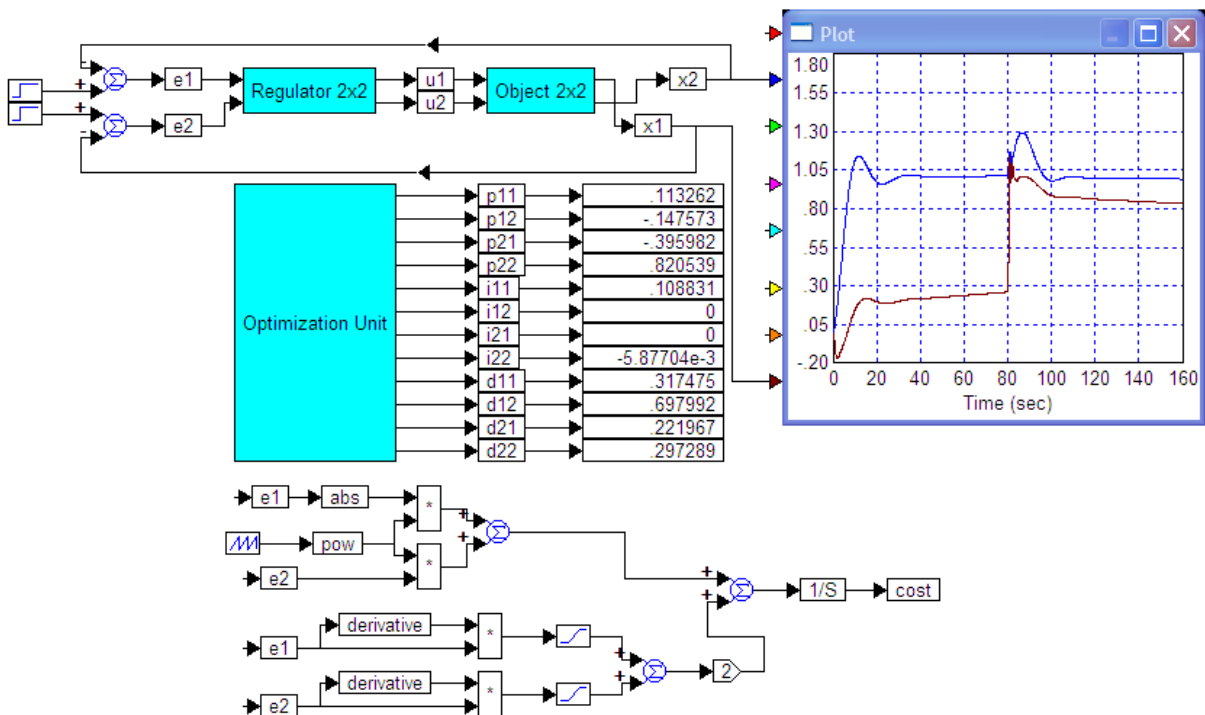


Рис. 8. Результат оптимизации после увеличения времени и задержки второго сигнала вдвое (время моделирования равно 160 с)

Как видим, к сожалению, результат, полученный после указанных модификаций, остается недостаточно удовлетворительным. Это выражается в том, что переходные процессы на осциллографе справа на *Рис. 8* не стремятся к их

предписанным значениям. Даже по прошествии некоторого времени, они не движутся к предписанным значениям, поскольку коэффициенты интеграторов в главной

диагонали регулятора равны нулю или очень малы.

3. РАДИКАЛЬНЫЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСТАТИЗМА

В данной статье предлагается радикальный метод обеспечения астатизма многоканальной системы, рассчитанной методом численной

оптимизации. С этой целью в блок вычисления стоимостной функции вводится дополнительно элемент для возведения в четвертую степень, как показано на Рис. 9. Этот блок на схеме обозначен меткой «pow», а метка «4» указывает на то, что выбрано возведение в четвертую степень. На Рис. 10 показан результат после увеличения времени моделирования

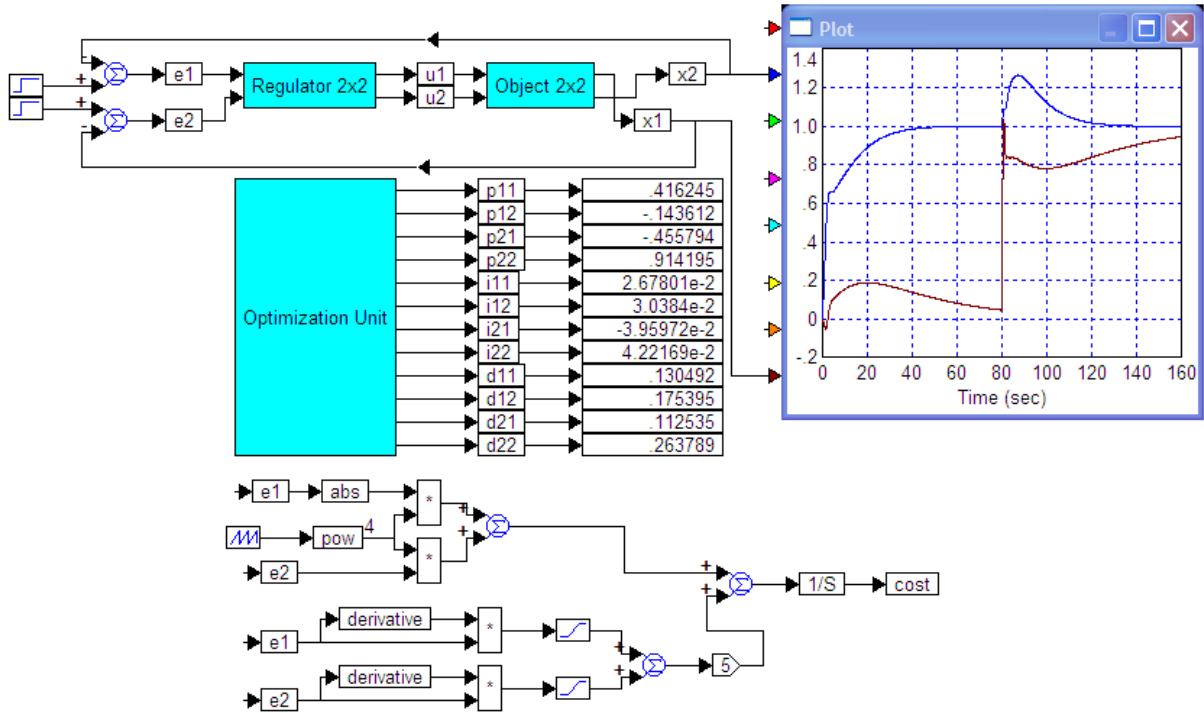


Рис. 9. Результат оптимизации после изменения нумерации выходов объекта и двух модификаций стоимостной функции: введены детекторы роста ошибки с весовым коэффициентом 5 и добавлением блока возведения в четвертую степень между выходом генератора пилообразного сигнала и входами умножающих устройств

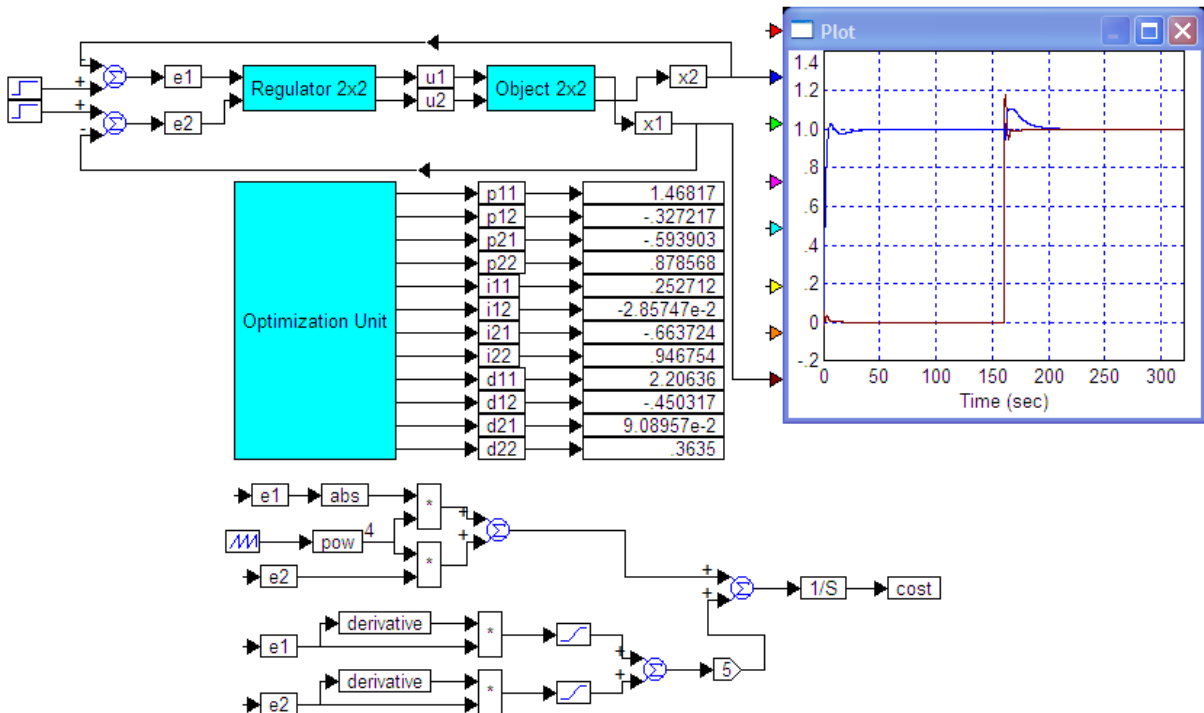


Рис. 10. Результат оптимизации после дополнительного увеличения времени моделирования

Результаты оптимизации можно признать вполне удовлетворительными. Как видно из Рис. 10, выходные сигналы объекта достаточно близки к ступенчатым входным сигналам. Для оценки качества переходного процесса целесообразно более внимательно рассмотреть эти процессы, как показано на Рис. 11. На вход первого канала в момент времени $t = 0$ поступает ступенчатый скачок, в результате этот сигнал задания изменяется от нуля до единицы. Это задание выходной сигнал повторяет относительно неплохо, поскольку, как видно, перерегулирование составляет не более 2%, приблизительно через 50 с процесс заканчивается полным успехом, далее выходной сигнал с высокой точностью равен единице. При поступлении на второй вход такого же единичного скачка выход первого канала реагирует на это возмущением, равным

приблизительно 10%, но по истечении менее чем 40 с выходной сигнал снова принимает требуемое значение, равное единице. Во втором канале перерегулирование несколько больше, но темпы его затухания значительно выше, а именно, небольшое возмущение около 2% присутствует на выходе второго канала в момент скачка на первом входе задания, но оно полностью затухает через 5 с, при подаче скачка на первый вход выходной сигнал изменяется в нужном направлении, достигает требуемого значения и движется по инерции далее, достигая перерегулирования около 18%, затем быстро возвращается обратно к предписанному значению, через 5 с выходной сигнал на втором выходе объекта снова становится равным предписанному значению с высокой точностью. Следовательно, система управления работает достаточно эффективно.

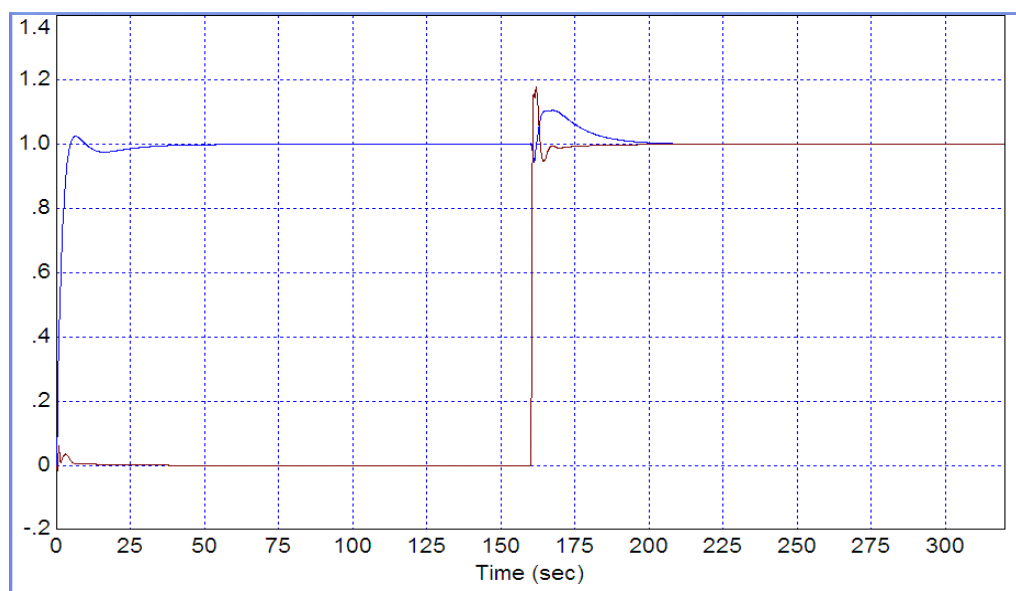


Рис. 11. Переходные процессы в системе, полученной в результате оптимизации после дополнительного увеличения времени моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье решена задача проектирования регулятора для двухканального объекта второго порядка. Продемонстрированы инструментарий численной оптимизации регуляторов для решения этой задачи [1–17], который данная статья дополняет возведением в четвертую степень сигнала, моделирующего время с начала переходного процесса. Предлагаемое дополнение к этому инструментарию достаточно эффективно, что подтверждается численным моделированием. В результате обеспечено относительно высокое качество переходного процесса и астатизм, т.е. нулевая статическая ошибка.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhmud V., Prokhorenko E., Liapidevskiy A. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. В сборнике: proceedings of the IASTED international conference on modelling, identification and control 30th IASTED conference on modelling, identification, and control, ASIATIC 2010. Сер. "Proceedings of the 30th IASTED conference on Modelling, Identification, And Control, Asiamic 2010" Phuket, 2010. С. 27-32.
- [2] Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем. Монография / Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2012.
- [3] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014. № 4 (13). С. 686-689.
- [4] Voevoda A.A., Zhmud V.A., Ishimtsev R.Y., Semibalamut V.M. The modeling tests of the new pid-

- regulators structures. В сборнике: Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. Palma de Mallorca, 2009. С. 165-168.
- [5] Воевода А.А., Жмудь В.А. Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и с запаздыванием. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2007. № 4 (29). С. 179-184.
- [6] Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators. В сборнике: Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.
- [7] Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А., Хассуонех В.А. Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 4 (46). С. 3-10.
- [8] Жмудь В.А., Ядрышников О. Численная оптимизация пид-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24-29.
- [9] Zhmud V., Dimitrov L., Yadrishnikov O. Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method. В сборнике: 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE 2014 Proceedings. 2014. С. 739-744.
- [10] Zhmud V., Vostrikov A., Semibalamut V. Feedback systems with pseudo local loops. В сборнике: Testing and Measurement: Techniques and Applications - Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015 2015. С. 411-417.
- [11] Воевода А.А., Жмудь В.А. Астатическое управление объектами с нестационарными матричными передаточными функциями методом приближенного обращения функциональных комплексных матриц. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 2 (23). С. 3-8.
- [12] Zhmud V., Zavorin A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. В сборнике: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. С. 7147060.
- [13] Жмудь В.А., Заворин А.Н. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах Труды XVI Международной конференции. Институт проблем управления сложными системами, Самарский научный центр Российской академии наук; под ред.: Е.А. Федосова, Н.А. Кузнецова, В.А. Виттиха. 2014. С. 557-567.
- [14] Zhmud V.A., Goncharenko A.M. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. В сборнике: Труды XIII Международной Научно-Технической Конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. Proceedings: in 12 volumes. 2016. С. 314-318.
- [15] Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Динамика мехатронных систем. Учебное пособие / Новосибирск, 2014.
- [16] Жмудь В.А., Заворин А.Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент на изобретение RU 2554291 C1, 27.06.2015. Заявка № 2014112628/28 от 01.04.2014.
- [17] Жмудь В.А., Заворин А.Н., Ядрышников О.Д. Неаналитические методы расчета ПИД-регуляторов. Учебное пособие / Новосибирск, 2013.

Алексей Игоревич Уберт – старший преподаватель кафедры автоматки НГТУ.

E-mail: ubert@corp.nstu.ru

630073, Новосибирск,
просп. К.Маркса, д. 20

Владимир Генрихович Шахтшнейдер – старший преподаватель кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: sch@ait.cs.nstu.ru

630073, Новосибирск,
просп. К.Маркса, д. 20

Статья поступила 22.05.2020

Regulator Design for Multidimensional Objects of the Second Order with Delay by Numerical Optimization

A.I. Ubert, V.G. Shachtshneider

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: Designing regulators for single-channel systems in the twenty-first century is no longer a difficult problem. Existing methods for their calculation by numerical optimization make it possible to relatively easily solve a substantial part of the problems, the solution of which was previously devoted to a lot of scientific articles, textbooks, monographs. Some of these tasks remained unsolved, which is associated with the specific features of the object models. Objects with many inputs and many outputs, called multichannel or multidimensional, and in the English language literature MIMO - Many Inputs Many Outputs - still pose a certain problem. Such problems are also solved in some cases by numerical optimization, but a systematic presentation of the methods for solving this problem is not enough in the literature. This article attempts to systematize the methodology for solving this problem with one example, which is of sufficient complexity due to the fact that in the matrix

transfer function of the object, each element is a second-order link with a delay element. The application of the method of numerical optimization directly, without any preliminary analytical actions, did not lead to the desired result, therefore, some special methods were used, which are recommended for solving such problems.

Key words: mathematical modeling, regulators, controllers, PID, multichannel systems, MIMO, stability, accuracy, control in technical systems, automation, cybernetics, numerical simulation, optimization

REFERENCES

- [1] Zhmud V., Prokhorenko E., Liapidevskiy A. The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.0/6. В сборнике: proceedings of the IASTED international conference on modelling, identification and control 30th IASTED conference on modelling, identification, and control, ASIAMIC 2010. Сер. "Proceedings of the 30th IASTED conference on Modelling, Identification, And Control, Asiamic 2010" Phuket, 2010. С. 27-32.
- [2] Zhmud V.A. Modeling, research and optimization of closed systems. Monograph / Novosibirsk State Technical University. Novosibirsk, 2012. (in Russian).
- [3] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014. № 4 (13). С. 686-689.
- [4] Voevoda A.A., Zhmud V.A., Ishimtsev R.Y., Semibalamut V.M. The modeling tests of the new pid-regulators structures. In: Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009 18th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. Palma de Mallorca, 2009. С. 165-168.
- [5] Voevoda A.A., Zhmud V.A. Convergence of controller optimization algorithms for an object with a limiter and with a delay. Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. 2007. No. 4 (29). S. 179-184. (in Russian).
- [6] Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators. В сборнике: Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.
- [7] Vasiliev V.A., Voevoda A.A., Zhmud V.A., Hassuoneh V.A. Digital controllers: target settings, selection of integration method, hardware implementation. Collection of scientific papers of Novosibirsk State Technical University. 2006. No. 4 (46). S. 3-10. (in Russian).
- [8] Zhmud VA, Yadrishnikov O. Numerical optimization of pid-regulators using the detector of the correctness of motion in the target function. Automation and software engineering. 2013. No. 1 (3). S. 24-29. (in Russian).
- [9] Zhmud V., Dimitrov L., Yadrishnikov O. Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method. В сборнике: 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering APEIE 2014 Proceedings. 2014. С. 739-744.
- [10] Zhmud V., Vostrikov A., Semibalamut V. Feedback systems with pseudo local loops. В сборнике: Testing and Measurement: Techniques and Applications - Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015 2015. С. 411-417.
- [11] Voevoda A.A., Zhmud V.A. Astatic control of objects with non-stationary matrix transfer functions by the method of approximate inversion of functional complex matrices. Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. 2006. No. 2 (23). S. 3-8. (in Russian).
- [12] Zhmud V., Zavorin A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. В сборнике: 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings 2015. С. 7147060.
- [13] Zhmud V.A., Zavorin A.N. A method for designing energy-saving controllers for complex objects with a partially unknown model. In the collection: Problems of control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference. Institute for Management of Complex Systems, Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Edited by: E.A. Fedosova, N.A. Kuznetsova, V.A. Wittich. 2014.S. 557-567. (in Russian).
- [14] Zhmud V.A., Goncharenko A.M. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. В сборнике: Труды XIII Международной Научно-Технической Конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения. Proceedings: in 12 volumes. 2016. С. 314-318.
- [15] Zhmud V.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. Dynamics of mechatronic systems. Textbook / Novosibirsk, 2014. (in Russian).
- [16] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Model structure for optimizing a feedback system. Patent for invention RU 2554291 C1, 06.27.2015. Application No. 2014112628/28 of 04/01/2014. (in Russian).
- [17] Zhmud V.A., Zavorin A.N., Yadrishnikov O.D. Non-analytical methods for calculating PID controllers (in Russian). Textbook / Novosibirsk, 2013.

Alexey Igorevich Ubert - Senior Lecturer, Department of Automation, NSTU.
E-mail: ubert@corp.nstu.ru
630073, Novosibirsk,
Ave. K. Marx, d.20

Vladimir Genrikhovich Shakhtschneider - Senior Lecturer, Department of Automation, NSTU.
E-mail: sch@ait.cs.nstu.ru
630073, Novosibirsk,
Ave. K. Marx, d.20

The paper has been received on 22/05/2020.