УДК 681.51
doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-7

Open Access RESEARCH ARTICLE

Управление дестабилизированными детерминированными системами

Дмитрий Сергеевич Курков
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
denfortmike@gmail.com

Михаил Вячеславович Кравчук
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
hammer22@bk.ru

Никита Сергеевич Михайлов
Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
nikitos200004@mail.ru

Аннотация. Посвящена изучению возможности управления детерминированными процессами в состоянии дестабилизации путем преждевременного расчета изменения управляющих коэффициентов и вычисления результата работы данной системы с внесением в таблицу результирующих коэффициентов корректирующего звена с целью недопущения дестабилизированного состояния системы. Для чего было произведено рассмотрение автоматизированной системы с алгоритмом прямого управления на примере нелинейной динамической системы второго порядка.

Ключевые слова: автоматизация, детерминированная система, алгоритм прямого управления, нелинейная динамическая система

Для цитирования: Курков Д. С., Кравчук М. В., Михайлов Н. С. Управление дестабилизированными детерминированными системами // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7(2). С. 1–6. doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-7

Management of destabilized deterministic systems

Dmitriy S. Kurkov
Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
denfortmike@gmail.com

Mikhail V. Kravchuk
Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
hammer22@bk.ru

Nikita S. Mikhaylov
Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
nikitos200004@mail.ru

Abstract. This article is devoted to the study of the possibility of controlling deterministic processes in a state of destabilization by prematurely calculating changes in control coefficients and calculating the result of the operation of this system with the introduction of the resulting coefficients of the corrective link in the table in order to prevent a destabilized state of the system. For this purpose, an automated system with a direct control algorithm was considered on the example of a nonlinear dynamic system of the second order.

Keywords: automation, deterministic system, direct control algorithm, nonlinear dynamic system

For citation: Kurkov D.S., Kravchuk M.V., Mikhaylov N.S. Management of destabilized deterministic systems. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology.* 2022;7(2):1–6. (In Russ.). doi:10.21685/2587-7704-2022-7-2-7

Автоматизация с каждым годом все больше и больше заполняет наш мир. И, наверное, уже не найти ни отрасли, ни отдельно взятой системы, в которой бы не была реализована автоматизация.

Ведь именно автоматизация позволяет удовлетворить потребности большого количества пользователей, так как предоставляет возможность вырабатывать количество продукции, равное спросу.

Автоматизация самого технологического процесса, при котором разрабатывается данная продукция, позволяет убрать человека с производства, сделать производство максимально автоматизированным. А это значит, что автоматизация технологического процесса позволяет исключить человеческий фактор. Она упрощает нам жизнь, позволяя использовать сэкономленное время на что-то большее. Но данное «упрощение», которое исключает человеческий фактор, убирает рабочие места для людей, усложняет саму разработку данной автоматизированной системы.

У любой системы есть так называемый «предел возможности» увеличения ее сложности. Итак, сложность детерминированной системы может возрастать до предельного уровня сложности и данный уровень превышать нельзя, иначе, согласно законам кибернетики, система войдет в состояние непредсказуемости.

Для того, чтобы в дальнейшем вести речь о детерминированных системах, введем краткое определение. Детерминированные системы – это такие системы, конечные состояния которых конкретно определяются управляющими воздействиями, оказанными на нее [1].

Системы данного типа, в соответствии с классификацией Стаффорда Бира, имеют все шансы являться элементарными (например, дверная задвижка), но не исключено, что они могут быть наисложнейшими (например, мейнфрейм (mainframe)) [2].

Ограничениями в дальнейшем развитии мейнфреймов, а также всех ЭВМ, являются ограничения в дальнейшем развитии процессоров, так как развитие одного элемента системы дает развитие всей системе, исходя из этого можно сказать, что отсутствие развития одного элемента (процессора) не даст дальнейшего развития всей системе (мейнфреймам).

Согласно закону Мура, «Количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца» [3]. Переломный момент для развития процессоров был в 2006 г. Когда требовалось осваивать техпроцесс, равный 40–45 нм. Но технический прогресс тогда не смог этого реализовать, а Гордон Мур сказал: «Мои полномочия как бы все, из-за фундаментальных причин» [4].

Но на этом развитие не остановилось и по сей день идет. Ближайшие границы развития процессоров – это:

1) приближение к лимиту размера транзистора;

2) скорость передачи данных не может превышать скорости света.

Что же будет, если человечество перейдет данный «предел»? Любая детерминированная система при переходе предела ее возможного развития, по окончании переходного процесса войдет в состояние неопределенности.

Целью данной статьи является изучение возможности управления детерминированной системой при переходе ее в состояние неопределенности, для этого требуется рассмотреть автоматизированную систему с алгоритмом прямого управления на примере нелинейной динамической системы второго порядка, состояние которой $F[n]$ описывается рекурсивным уравнением:

$$F[n+1] = a \cdot F[n] \cdot \left(1 - \frac{F[n]}{N}\right), \qquad (1)$$

где $F[n]$ – текущее состояние системы; a – параметр, который определяет динамические свойства системы; N – масштабный коэффициент.

На первом этапе решается теоретическая задача вывода функции преобразования корректирующего звена, обеспечивающего линейность функции управления:

$$F[\infty] = CS, \qquad (2)$$

где $F[\infty]$ = const – конечное состояние системы, CS – сигнал управления (control signal).

На данном этапе реализуется нахождение минимального числа тактов $n_{\min}$, при котором второе условие будет выполняться с ошибкой менее Er, т.е. цель управления будет достигнута.

Каждый из параметров 1-го уравнения: a; N; $F[0]$ влияет на текущее состояние $F[n]$ объекта управления, следовательно, может быть использован для реализации функции алгоритма управления [5]. Из этого следует, что на первом этапе разработки алгоритма управления необходимо провести анализ влияния каждого их них на процесс управления. Кроме того, при разработке алгоритма необходимо учесть исходные данные на возможность их изменения.

При условии, что переходный процесс закончился ($X[n] = X[n + 1] = \ldots = X[\infty] = \text{const}$), уравнение (1) примет вид:

$$F[\infty] = a \cdot F[\infty] \cdot \left(1 - \frac{F[\infty]}{N}\right). \tag{3}$$

Исключим нулевое решение ($F[\infty] \neq 0$), тогда

$$1 = a \cdot \left(1 - \frac{F[\infty]}{N}\right). \tag{4}$$

Из 4-го уравнения найдем $F[\infty]$:

$$F[\infty] = \frac{N \cdot (a - 1)}{a}. \tag{5}$$

Допустим, что N имеет константное значение ($N = \text{const}$), то искомая функция управления будет приведена к следующему виду:

$$CS = \frac{N \cdot (a - 1)}{a}. \tag{6}$$

Из 6-го уравнения находим искомую функцию:

$$a = \frac{N}{N - CS}. \tag{7}$$

Функция управления (7) корректна, при условии, что переходной процесс окончился. Критерий окончания переходного процесса заключается в выполнении условия того, что ошибка регулирования, начиная с некоторого минимального номера такта $n_{\min}$ и далее меньше заданного значения (по модулю):

$$|\,\mathrm{Er}[n_{\min}]\,| < \mathrm{Er}\ ;\ |\,\mathrm{Er}[n_{\min} + 1]\,| < \mathrm{Er}\ ;\ |\,\mathrm{Er}[n_{\min} + 2]\,| < \mathrm{Er}\ \ldots$$

Численное значение $n_{\min}$ для конкретного значения сигнала управления CS можно получить только методом численного расчета, а для практического использования свести результаты расчетов в таблицу и график.

Для проверки теоретических расчетов проведем исследование зависимости параметров управления $\{F[0], N, a\}$ на функцию преобразования «вход/выход» $F[n] = F(CS, F[0], N, a)$ на частном примере. Для расчетов будем использовать систему автоматизированного проектирования MathCAD.

Входные данные: $X[0] = 1$; $N = 1000$; $a = 1{,}4$.

Для наглядного представления графиков зададим 50 тактов ($T = 50$).

Вывод: после окончания переходного процесса результат $F[t]$ не меняется ($n_{\min} = 30$), не зависит от $F[0]$, но зависит от a и N.

По окончании переходного процесса система переходит в состояние $F[50] = 286$, которое совпадает с теоретическим значением CS, рассчитанным по формуле (6) для значения $a = 1{,}4$.

Исследование работы алгоритма коррекции для системы автоматизированного управления с прямым управлением.

Проведем проверку работы структуры (рис. 2) системы управления динамическим объектом с алгоритмом прямого управления по алгоритму коррекции (7). Вариант программы и пример расчета с помощью системы автоматизированного проектирования MathCAD.

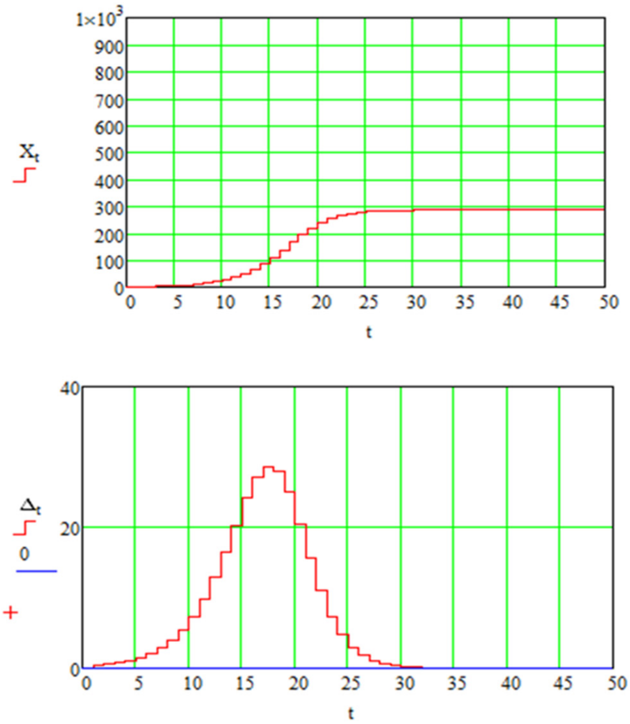
Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что система перешла в заданное состояние ($CS = 400$) за 15 тактов. Из этого следует, что алгоритм прямого управления работает правильно.

Как было сказано выше, время регулирования, т.е. число тактов переходного процесса $n_{\min}$, до получения заданной погрешности CS нельзя рассчитать аналитически (по формулам), но можно получить численным расчетом. Поскольку число тактов переходного процесса зависит от значения сигнала управления CS, в следующем подразделе проведем исследование зависимости числа тактов переходного процесса $n_{\min}$ до получения заданной погрешности $\mathrm{Er} = 1$ установления выходного состояния системы в зависимости от значения сигнала управления CS.

$X_0 := 1 \qquad T := 50 \qquad t := 0..T \qquad \alpha := 1.4 \qquad N := 1000$

$X_{t+1} := \alpha \cdot X_t \cdot \left(1 - X_t \cdot N^{-1}\right) \qquad \Delta_{t+1} := X_{t+1} - X_t \qquad Xr := N \cdot \frac{(\alpha - 1)}{\alpha}$

$Xr = 286 \qquad X_T = 286$



t =	X_t =	Δ_t =
0	1	0
1	1	0
2	2	1
3	3	1
4	4	1
5	5	2
6	7	2
7	10	3
8	14	4
9	20	5
10	27	7
11	37	10
12	50	13
13	66	16
14	86	20
15	110	24
16	138	27
17	166	29
18	194	28
19	219	25
20	239	20
...	...	...

Рис. 1. Пример исследования зависимостей параметров объекта управления

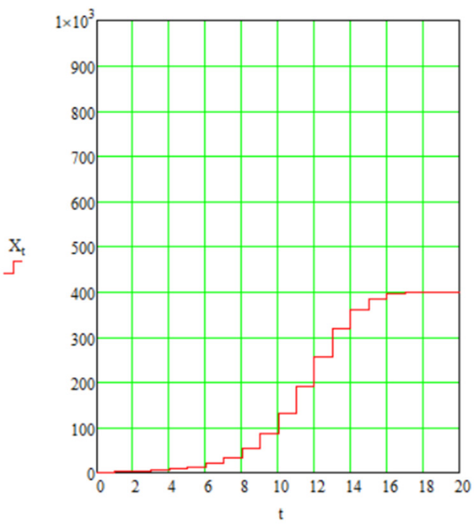
$X_0 := 1 \qquad T := 1000 \qquad CS := 400 \qquad N := 1000$

$\alpha := \frac{N}{N - CS} \qquad t := 0..T \qquad \alpha = 1.667 \qquad Xr := N \cdot \frac{\alpha - 1}{\alpha} \qquad X_{t+1} := \alpha \cdot X_t \cdot \left(1 - X_t \cdot N^{-1}\right)$

$\Delta_{t+1} := X_{t+1} - X_t \qquad Er_{t+1} := CS - X_t$

$X_{T-1} = 400 \qquad X_{T-2} = 400 \qquad X_{T-5} = 400 \qquad X_{T-6} = 400$

$X_{T-3} = 400 \qquad X_{T-4} = 400 \qquad X_{T-7} = 400 \qquad X_{T-8} = 400$



X_t =	Δ_t =
1	0
2	1
3	1
5	2
8	3
13	5
21	8
34	13
55	21
86	31
131	45
190	59
256	66
318	61
361	44
385	23
394	10
398	4
399	1
400	0
400	0
400	0
400	0
400	0

Er =
0
399
398.335
397.23
395.395
392.361
387.366
379.209
366.069
345.367
313.92
268.883
210.124
143.628
82.258
38.697
15.395
5.527
1.893
0.637
0.213
0.071
0.024
$7.901 \cdot 10^{-3}$

Рис. 2. Пример работы элемента коррекции для системы автоматизированного управления с прямым управлением

Для проведения исследования зависимости времени окончания переходного процесса от значения сигнала управления *CS* необходимо провести предварительное исследование и ответить на следующие вопросы.

1. Определить допустимый интервал значений сигнала управления *CS*, на котором система находится в устойчивом состоянии.

2. Определить общий характер функции зависимости $n_{\min} = F(CS)$.

3. Существуют ли точки сингулярности – значения аргумента *CS*, когда выполняется условие, что погрешность Er = 0 (при условии, что $n \geq \text{const}$).

Согласно теории нелинейных систем детерминированного хаоса (данная система относится к этому классу систем) свойством сингулярности данная система может обладать. Наша задача заключается в том, чтобы определить значения сигнала управления *CS*, для которых это свойство проявляется.

По первому пункту было установлено, что допустимый интервал значений сигнала управления *CS*, при условии, что Er < 1, а время переходного процесса $n_{\min}$ меньше 100 тактов (выбрано произвольно) лежит в пределах:

$$81 < CS < 662{,}85$$

Для определения общего характера функции зависимости $n_{\min} = F(CS)$ был проведен расчет в интервале значений $n_{\min}$ от 100 до минимального значения $n_{\min} = 6$ (получено экспериментально).

Помимо всех уже введенных расчетных коэффициентов требуется ввести коэффициент Xr. Xr, есть показатель установки автоматизированной системы в состояние стабилизации после окончания переходного процесса.

Таблица 1

Результаты исследования переходных процессов

Номер опыта i	CS_i	$n_i = n_{\min}$ ($\lvert Er \rvert \leq 1$)	α_i	Xr не меняется ($n < ?$)
1	81	79	1,089	92
2	200	35	1,25	40
3	300	21	1,428571429	28
4	523	9	2,096436059	11
5	534,1	10	2,146383344	12
6	562,5	8	2,285714286	9
7	597,69	6	2,485645398	10
8	603	10	2,51889	14
9	629,8	15	2,70124	20
10	639,39	12	2,77308	14
11	**640,953**	**6**	**2,78515**	**11**
12	641,011	7	2,7856	13
13	641,09	8	2,78621	15
14	641,85	12	2,79213	17
15	646,3	20	2,82725	24
16	656	39	2,90698	62
17	661,8	77	2,957	115
18	662,85	98	2,966	132
19	666	121	2,957	570
20	667	–	3,003	–

Исходя из табл. 1, следует вывод, что в диапазоне 81 < *CS* < 562,5 система переходит в заданное состояние от $t_{0\max} \approx 92$ до $t_{\min} \approx 9$. После чего в диапазоне 562,5 < *CS* ≤ 666 происходит увеличение времени *t* (времени до завершения переходного процесса) до $t_{\max} \approx 570$. При дальнейшем увеличении коэффициента конечного состояния объекта управления (*CS*) система автоматизированного управления с прямым управлением переходит в неопределенное состояние $Xr \approx \infty$.

Критические значения *CS* наступают при *CS* > 666, после чего система теряет устойчивость и переходит в колебательный режим. Но при этом до 667 итерации *CS* переходный процесс все еще находится в стабильном состоянии, так как на каждой дискретной итерации времени *t* цикл колебательного процесса завершается.

Экспериментальным образом было определено то, что просчет колебаний, появившихся при критическом «усложнении» автоматизированной системы, которое повлекло за собой переход системы в состояние неопределенности, является возможным. Исходя из этого, можно составить таблицу значений колебаний и корректировать выходной сигнал с их помощью с целью исключения возможного выхода системы из строя.

Тем самым была доказана теоретическая возможность управления детерминированными процессами в состоянии дестабилизации путем преждевременного расчета изменения управляющих коэффициентов и вычисления результата работы данной системы с внесением в таблицу результирующих коэффициентов корректирующего звена с целью недопущения дестабилизированного состояния системы.

Список литературы

1. Волков В. Л. Моделирование процессов и систем в приборостроении : учеб. пособие для студентов технических специальностей дневной, вечерней и заочной форм обучения. Арзамас : АПИ НГТУ, 2008. 143 с.
2. Гришко А. К., Лапшин Э. В., Полтавский А. В. [и др.]. Основы управления в радиоэлектронных системах : учеб. пособие / под ред. Э. В. Лапшина. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2016. 202 с.
3. Майоров С. А., Кириллов В. В., Приблуда А. А. Введение в микроЭВМ. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 304 с.
4. Что такое закон Мура и как он работает теперь? Разбор. URL: https://droider.ru/post/chto-takoe-zakon-mura-i-kak-on-rabotaet-teper-razbor-02-06-2021/ (дата обращения: 04.03.2022).
5. Чувыкин Б. В., Долгова И. А. Основы теории управления для информационных систем : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. 198 с.

References

1. Volkov V.L. *Modelirovanie protsessov i sistem v priborostroenii: ucheb. posobie dlya studentov tekhnicheskikh spetsial'nostey dnevnoy, vecherney i zaochnoy form obucheniya = Modeling of processes and systems in instrumentation: A textbook for students of technical specialties of daytime, evening and correspondence forms of education.* Arzamas: API NGTU, 2008:143. (In Russ.)
2. Grishko A.K., Lapshin E.V., Poltavskiy A.V. et al. *Osnovy upravleniya v radioelektronnykh sistemakh: ucheb. posobie = Fundamentals of control in radio-electronic systems: A textbook.* Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2016:202. (In Russ.)
3. Mayorov S.A., Kirillov V.V., Pribluda A.A. *Vvedenie v mikroEVM = Introduction to microcomputer*. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1988:304. (In Russ.)
4. *Chto takoe zakon Mura i kak on rabotaet teper'? Razbor = What is Moore's Law and how does it work now? An analysis*. (In Russ.). Available at: https://droider.ru/post/chto-takoe-zakon-mura-i-kak-on-rabotaet-teper-razbor-02-06-2021/ (accessed 04.03.2022).
5. Chuvykin B.V., Dolgova I.A. *Osnovy teorii upravleniya dlya informatsionnykh sistem: ucheb. posobie = Fundamentals of control theory for information systems: A textbook.* Penza: Izd-vo PGU, 2014:198. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 25.02.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.03.2022

Принята к публикации / Accepted 29.04.2022