

Математическая модель управления конфигурацией программных средств в автоматизированных системах управления технологическими процессами

П.Г. Фрасын

Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)

Аннотация: Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами программные комплексы мониторинга, диспетчеризации, обработки данных и управления промышленным оборудованием. Корректная работа этих систем зависит от предсказуемого и устойчивого развертывания программных компонентов, что требует детерминированного подхода к управлению конфигурацией. В данной работе предложена математическая модель управления конфигурацией программных средств, основанная на разностных уравнениях дискретных систем. Проведено численное моделирование в среде Octave, подтверждающее корректность предложенной модели и позволяющее анализировать влияние параметров управления на динамику процесса. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации стратегий автоматизированного развертывания программных комплексов в промышленных системах.

Ключевые слова: автоматизированное управление, программные комплексы, дискретные системы, разностные уравнения, устойчивость, диспетчеризация, мониторинг.

Введение

Программные средства, используемые в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП), выполняют критически важные функции диспетчеризации, сбора и обработки данных, анализа параметров работы оборудования, а также удаленного управления промышленными объектами [1]. В современных промышленных системах программные комплексы включают системы мониторинга технологических параметров, такие как SCADA-системы и платформы IoT, а также системы диспетчерского управления и телеметрии. Кроме того, используются серверные компоненты обработки данных и вычислительные узлы, обеспечивающие высокопроизводительные вычисления. Для интеграции с ERP, MES и другими уровнями автоматизации применяются специализированные программные интерфейсы [2].

Для обеспечения надежности и отказоустойчивости АСУТП необходимо, чтобы программные компоненты развертывались в строго определенном порядке, соблюдая зависимости между сервисами, а также корректно обновлялись без нарушения технологического процесса. Ошибки в конфигурации программных средств могут приводить к нестабильности системы, сбоям в управлении технологическим процессом и нарушениям безопасности.

Традиционные методы развертывания программных комплексов, основанные на ручной настройке, не обеспечивают предсказуемости и повторяемости процессов, особенно в условиях распределенных АСУТП. Для решения этой проблемы используются автоматизированные системы управления конфигурацией, реализованные в виде декларативных инструментов, таких как Ansible, Terraform или Saltstack [3]. Однако такие системы должны учитывать устойчивость конфигурационного процесса, при котором повторное применение конфигурации не изменяет состояние системы, а также детерминированность развертывания, обеспечивающую запуск программных компонентов в строго заданном порядке без расхождений. Кроме того, необходимо учитывать наличие временных задержек, поскольку запуск программных модулей и их взаимодействие с сетевыми сервисами требует точного управления временем.

В данной работе разработана математическая модель управления конфигурацией программных средств в АСУТП, позволяющая описывать динамику изменения состояния системы во времени, анализировать устойчивость процессов конфигурирования и учитывать запаздывания, возникающие при автоматизированном развертывании.

Применение теории дискретных систем управления в АСУТП

Процессы конфигурирования программных средств в АСУТП можно описать с использованием методов теории автоматического управления

(ТАУ), применяемых к дискретным динамическим системам [4]. В таких системах изменение состояния происходит пошагово, под влиянием управляющих воздействий, что соответствует последовательному разворачиванию программных компонентов [5].

Процесс конфигурирования можно представить как дискретное разностное уравнение, описывающее эволюцию состояния системы:

$$S(t + 1) = f(S(t), u(t)), \quad (1)$$

где:

- $S(t)$ – вектор состояния системы в момент времени t ,
- $u(t)$ – управляющее воздействие, определяющее изменение состояния,
- $f(S, u)$ – функция перехода, задающая динамику системы.

В системах автоматизированного конфигурирования управляющее воздействие [6] $u(t)$ заменяется оператором конфигурации O , который определяет переход к новому состоянию:

$$S_{current}(t + 1) = O(S_{current}(t)), \quad (2)$$

Данное представление [7] позволяет анализировать устойчивость процесса конфигурирования, его сходимость к заданному состоянию и влияние параметров управления.

Управление по отклонению

Для обеспечения устойчивого конфигурирования программных средств применим метод управления по отклонению, при котором система стремится минимизировать разницу между текущим и желаемым состоянием:

$$e(t) = S_{desired} - S_{current}(t), \quad (3)$$

Используя принципы регулирования дискретных систем, можно записать процесс коррекции конфигурации:

$$S_{current}(t+1) = S_{current}(t) + Ke(t), \quad (4)$$

где K – коэффициент коррекции, определяющий скорость изменения конфигурации.

Это, в свою очередь, позволит гарантировать, что система с течением времени достигает заданного состояния без нежелательных отклонений [8].

Влияние задержек на процесс конфигурирования

Развертывание программных средств в АСУТП может сопровождаться запаздываниями, вызванными временем загрузки программных компонентов, обработкой сетевых запросов и взаимодействием сервисов, а также асинхронным применением конфигурации в распределенных системах [9].

Для учета данных эффектов применим разностное уравнение с временным запаздыванием τ :

$$S_{current}(t+1) = O(S_{current}(t-\tau)), \quad (5)$$

Моделирование системы

Для анализа сходимости конфигурационного процесса проведено численное моделирование в Octave [10]. В ходе моделирования рассчитана эволюция состояния системы при различных параметрах регулирования и наличии временных задержек.

- Число итераций $T = 50$
- Начальное состояние $S_{current}(1) = 0$
- Желаемое состояние $S_{desired} = 1$
- Коэффициент коррекции $K = 0.2$
- Временная задержка $\tau = 3$

Код моделирования представлен на рис. 1.

```
% Параметры моделирования
T = 50;
S_desired = 1;
S_current = zeros(1, T);
S_current(1) = 0;
K = 0.2;
tau = 3;

% Моделирование процесса
for t = 2:T
    if t > tau
        e = S_desired - S_current(t - tau);
        S_current(t) = S_current(t - 1) + K * e;
    else
        S_current(t) = S_current(t - 1);
    end
end

% Визуализация
figure;
plot(1:T, S_current, 'b-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(1:T, ones(1, T), 'r--', 'LineWidth', 2);
xlabel('Шаги времени t');
ylabel('Состояние S_{current}');
title('Процесс сходимости системы');
legend('S_{current}(t)', 'S_{desired}', 'Location', 'southeast');
grid on;
```

Рис. 1. – Код для моделирования

Результат моделирования представлен на рис.2, где показан переходный процесс системы, подтверждающий влияние коэффициента коррекции и временной задержки на поведение конфигурационного процесса.

График отражает динамику изменения состояния системы во времени, позволяя проанализировать влияние коэффициента коррекции и временной задержки. Видно, что при увеличении временной задержки процесс конфигурирования замедляется, а при росте коэффициента коррекции возможно появление колебаний.

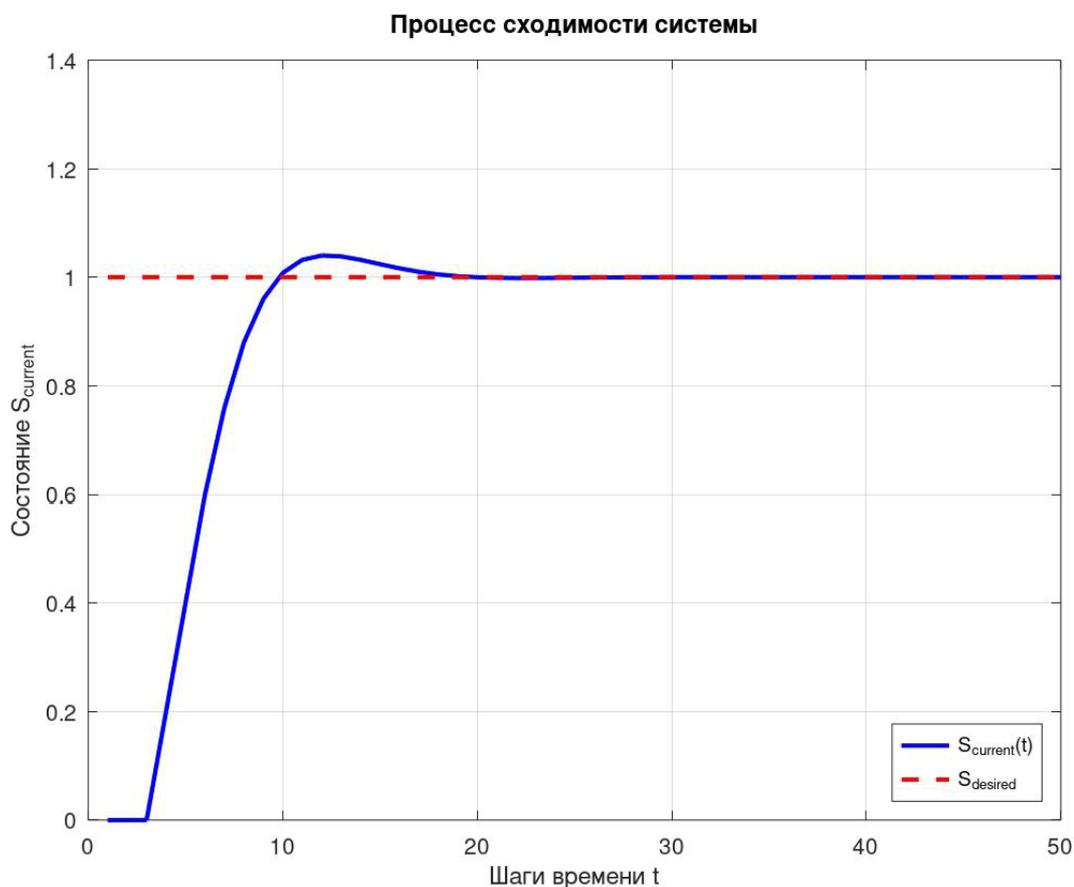


Рис. 2. – Результат моделирования в виде переходного процесса

Выводы

Результаты моделирования подтверждают устойчивость предложенной модели и показывают достижение заданного состояния при оптимальном значении $K = 0.2$, замедление реакции системы при увеличении временной задержки τ и колебания конфигурационного процесса при чрезмерном увеличении коэффициента коррекции. Таким образом, предложенная математическая модель позволяет анализировать динамику конфигурирования программных средств в АСУТП, учитывать влияние временных характеристик и обеспечивать устойчивость процессов развертывания программного обеспечения.

Литература

1. Рыбалев А.Н., Николаец Ф.А. Разработка и эмулирование АСУ ТП с использованием программ разных производителей и типов // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2014. №65. С. 73-82. URL: vestnik.amursu.ru/archive/2014/65/razrabotka-i-emulirovanie-asu-tp-s-ispolzovaniem-programm-raznyh-proizvoditelej-i-tipov (дата обращения: 09.02.2025)
2. Симонова Л.А., Хисамутдинов М.Р. Импортзамещение в задаче интеграции информационных систем PLM, ERP и MES // Фундаментальные исследования. 2016. №12. С. 338-343. URL: fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41094 (дата обращения: 09.02.2025)
3. Каменев А.С. Системы мониторинга ИТ-инфраструктуры на основе больших данных // Инженерный вестник Дона. 2024. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9028 (дата обращения: 09.02.2025).
4. Israelsson H., Bello L. Configuration Management for Industrial Automation // Lund: Lund University, Department of Automatic Control, 2009, P. 141 (ISSN 0280-5316) ISRN LUTFD2/TFRT-5835-SE. URL: lup.lub.lu.se/student-papers/record/8847533/file/8859318.pdf (дата обращения: 09.02.2025)
5. Usubamatov R., Ismail K.A., Sah J.M. Mathematical models for productivity and availability of automated lines // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, № 66. URL: researchgate.net/publication/257336710_Mathematical_models_for_productivity_and_availability_of_automated_lines
6. Петренко С.В., Яковлев Ал.В., Яковлев Ан.В.. Синтез математической модели автоматизированной системы управления специального назначения с микроядерной архитектурой // Вопросы современной науки и практики.



Университет им. В.И.Вернадского. 2009. №1. С.160-169. URL: vernadsky.tstu.ru/pdf/2009/01/rus_25.pdf

7. Irons L.G., Irons M.A. Terraform sustainability assessment framework for bioregenerative life support systems // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021. Т. 8. DOI: 10.3389/fspas.2021.789563. URL: doi.org/10.3389/fspas.2021.789563 (дата обращения: 09.02.2025)

8. Vaillancourt P., Wineholt B., Barker B., Deliyannis P., Zheng J., Suresh A., Brazier A., Knepper R., Wolski R. Reproducible and Portable Workflows for Scientific Computing and HPC in the Cloud // *arXiv preprint arXiv:2006.05016*. 2020. URL: arxiv.org/abs/2006.05016 (дата обращения: 09.02.2025)

9. Голоскоков К.П., Васин А.В., Марлей В.Е. Выбор технических средств автоматизированных систем управления на этапе проектирования // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2024. № 4. С. 7-13. URL: vestnik.astu.org/ru/nauka/article/90452/view

10. Корнюшкин Д.А., Крылов А.А. Задачи совершенствования современных автоматизированных систем управления технологическими процессами // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8284/ (дата обращения: 09.02.2025)

References

1. Rybalev A.N., Nikolaets F.A. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. No. 65. pp. 73-82. URL: vestnik.amursu.ru/archive/2014/65/razrabotka-i-emulirovanie-asu-tp-s-ispolzovaniem-programm-raznyh-proizvoditelej-i-tipov/

2. Simonova L.A., Khisamutdinov M.R. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2016. No. 12. pp. 338–343. URL: fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41094 (accessed: 09.02.2025).



3. Kamenev A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/9028 (accessed: 09.02.2025).
4. Israelsson H., Bello L. Lund: Lund University, Department of Automatic Control, 2009, P. 141. (ISSN 0280-5316) ISRN LUTFD2/TFRT–5835–SE. URL: lup.lub.lu.se/student-papers/record/8847533/file/8859318.pdf (accessed: 09.02.2025)
5. Usubamatov R., Ismail K.A., Sah J.M. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, № 66. URL: researchgate.net/publication/257336710_Mathematical_models_for_productivity_and_availability_of_automated_lines
6. Petrenko S.V., Yakovlev Al.V., Yakovlev An.V. Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. 2009. No. 1. pp. 160–169. URL: vernadsky.tstu.ru/pdf/2009/01/rus_25.pdf
7. Irons L.G., Irons M.A. Frontiers in Astronomy and Space Sciences. 2021. T. 8. DOI: 10.3389/fspas.2021.789563. URL: doi.org/10.3389/fspas.2021.789563 (accessed: 09.02.2025)
8. Vaillancourt P., Wineholt B., Barker B., Deliyannis P., Zheng J., Suresh A., Brazier A., Knepper R., Wolski R. arXiv preprint arXiv:2006.05016. 2020. URL: arxiv.org/abs/2006.05016 (accessed: 09.02.2025)
9. Goloskokov K.P., Vasin A.V., Marley V.E. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2024. No. 4. pp. 7–13. URL: vestnik.astu.org/ru/nauka/article/90452/view
10. Korniyushkin D.A., Krylov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. No. 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8284 (accessed: 09.02.2025).

Дата поступления: 10.01.2025

Дата публикации: 25.02.2025