

*В.М. Дозорцев, Е.С. Баулин (ООО «Центр цифровых технологий» МФТИ),
А.А. Аносов, А.Б. Боронин (АО «Хоневелл»)*

Сквозная оптимизация производства: реальная возможность или отдаленная перспектива?

Приводится исторический очерк развития двух распространенных систем промышленной оптимизации – планирования производства и усовершенствованного управления технологическими процессами. Подчеркивается существовавший многие годы разрыв между этими системами, объясняемый сложностью их синхронизации из-за принципиально разного уровня детализации описания объекта и отсутствия алгоритмических и программных инструментов такой синхронизации. Формулируется задача сквозной оптимизации производства, призванной преодолеть указанный разрыв и позволяющей перейти к планированию производства в замкнутом контуре путем реализации выбранного оптимального плана с помощью систем каскадного усовершенствованного управления. Кратко характеризуются появляющиеся решения сквозной оптимизации от ведущих производителей систем промышленной автоматизации.

Ключевые слова: оптимизационное планирование производства, календарное планирование, линейное и последовательное линейное программирование, аналитическое конструирование регуляторов, усовершенствованное управление технологическими процессами, управление с прогнозирующими моделями (MPC), каскадное MPC, сквозная оптимизация производства.

Дозорцев Виктор Михайлович – д-р техн. наук, директор по развитию бизнеса,
Баулин Евгений Сергеевич – канд. техн. наук, директор по разработкам и исследовательской деятельности, ООО «Центр цифровых технологий» МФТИ (НИУ),
Аносов Андрей Александрович - канд. техн. наук, начальник отдела систем планирования производства, снабжения и сбыта,
Боронин Андрей Борисович - канд. техн. наук, старший консультант отдела систем планирования производства, снабжения и сбыта, АО «Хоневелл».

Список литературы

1. Интервью Л.В. Канторовича газете "Неделя". 3-9 августа 1987. № 31.
2. Ugray Z. et al. Search and Local NLP Solvers: A Multistart Framework for Global Optimization // *INFORMS Journal on Computing*. 2007, 19(3): 328–340.
3. Lasdon L. et al. Improved Filters and Randomized Drivers for Multi-start Global Optimization / The University of Texas, Austin. Paper Series No. IROM-06-06, May 2006.
4. Varvarezos D.K. et al. New Optimization Paradigms for Refinery Planning / FOCAP0 Conference, May 2008.
5. Городнова М.В., Хохлов А.С. Имитационный подход к решению задачи календарного планирования и построения расписаний в нефтепереработке // *Автоматизация в промышленности*. 2018. №12. С. 15-21.
6. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. – М.: И.Д. Вильямс. 2007.
7. Антонов В. Г., Шепелявый А. И. Оптимальное управление на конечном интервале времени для дискретных систем в задаче минимизации неоднородного квадратичного функционала // *Автоматика и телемеханика*. 1973, № 4, 43– 50.
8. Левичев Ю. Е. Решение одной задачи аналитического конструирования регуляторов // *Автоматика и телемеханика*. 1970, № 2, 159–160.
9. Дозорцев В.М. Задача оптимального регулирования по возмущению в технологических процессах с неквадра-

- тическими критериями качества / В сб.: «Методы оптимизации сложных систем» под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1987. С.92-97.
10. *Toivonen, H.T.* Minimum Variance Control of First-Order Systems with a Constraint on the Input Amplitude // IEEE Transactions on Automatic Control. 1981, 26(2): 556-558.
 11. *Deley, G.W., Franklin G.F.* Optimal Bounded Control of Linear Sampled-data Systems with Quadratic Loss // Journal of Basic Engineering. 1965, 87(1): 135-141.
 12. *Дозорцев В.М., Фоломкин Ю.Б.* Аналитическое конструирование регуляторов при ограничениях по управлению / Сб. трудов 23 междунар. научной конф. «Математические методы в технике и технологиях», Смоленск, 2010. Т. 2. С. 106-109.
 13. *Perelman I.I., Dozortsev V.M.* Quasioptimal Process Control with Production Cost Minimization // Proc. 2nd IFAC/IFORS Symposium Optimization Methods. Varna (Bulgaria), 1979. P. 271-278.
 14. *Перельман И.И., Усевич Н.А., Дозорцев В.М. и др.* Динамическая оптимизация ТП на примере управления методической печью. – М.: ИПУ РАН, 1988.
 15. *Cutler, C.R. and Ramaker, B.C.* Dynamic Matrix Control — A computer control algorithm / In: Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, CA, 1980.
 16. *Prett, D.M., Gillette, R.D.* Optimization and constrained multivariable control of a catalytic cracking unit / In: Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, CA, 1980.
 17. *Garcia, C.E., Morshedi, A.* Quadratic programming solution of dynamic matrix control (QDMC) // Chemical Engineering Communications. 1986, 46(1-3): 73-87.
 18. *Grosdidier P. et al.* The IDCOM-M controller / In T. J. McAvoy et al (Eds.), Proceedings of the 1988 IFAC workshop on model based process control (pp. 31–36). Oxford: Pergamon Press, 1988.
 19. *Marquis, P., Broustail, J.P.* SMOC, a bridge between state space and model predictive controllers: Application to the automation of a hydrotreating unit / In T. J. McAvoy et al (Eds.), Proceedings of the 1988 IFAC workshop on model based process control (pp. 37–43). Oxford: Pergamon Press, 1988.
 20. *Clarke, D.W., Mohtadi, C., Tuffs, P.S.* Generalized Predictive Control – Part II. Extensions and Interpretations // Automatica. 1987, 23(2): 149-160.
 21. *Kwon, W.H., Pearson, A.E.* A Modified Quadratic Cost Problem and Feedback Stabilization of a Linear System // IEEE Transactions on Automatic Control, AC-22. 1977, 1:838-842.
 22. *Mayne, D.Q., Michalska, H.* Robust Receding Horizon Control of Constrained Nonlinear Systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1993, 38:1623-1633.
 23. *Kouvaritakis, B., Rossiter, J.A., Chang, A.O.T.* Stable Generalized Predictive Control: An Algorithm with Guaranteed Stability // Proceedings IEEE. 1992, Part D, 139(4): 349-362. [Http://www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)
- 12 м а р т 2 022 А В Т О М А Т И З А Ц И Я В П Р О М Ы Ш Л Е Н Н О С Т И
- Новые решения по оптимизации производства
24. *Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В.* APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005, №10, 56-62.
 25. *Lahiri S.K.* Multivariable Predictive Control: Applications in Industry. A guide to all practical aspects of building, implementing, managing, and maintaining MPC applications in industrial plants. – John Wiley & Sons, 2017. 304 p.
 26. *Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В.* Технологические компьютерные тренажеры: все что вы всегда хотели знать... // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004, № 12, 1-13.
 27. *Dozortsev V., Slastenov I., Tazanbaev S.* First Principles Simulation Model Identification Based on Real Industrial Process Data / In Proceedings of the ECEC'2015-EUROMEDIA'2015- FUBUTEC'2015 Conference (Lisbon, Portugal, April 27- 29, 2015), pp. 11-14.
 28. Guide to advanced control systems. API recommended practice 557 / American Petroleum institute, 2000.
 29. *Розенберг Л.С., Рудяк К.Б., Исаев В.Б., Лебединский А.А., Дозорцев В.М., Антонов А.В.* Повышение эффективности работы установки первичной переработки нефти с помощью системы усовершенствованного управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007, № 2, 6-12.
 30. *Захаркин М.А., Кнеллер Д.В.* Применение методов и средств усовершенствованного управления технологическими процессами (APC) // Датчики и системы. 2010, №11, 57-71.
 31. *Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В.* Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013, № 1, 12-19.
 32. *Bodington E. (Eds.)*. Planning, scheduling, and control integration in the process industries – New York: McGraw-Hill, 1995.
 33. *Harjunkskia I. et al.* Integration of scheduling and control — Theory or practice? // Computers & Chemical Engineering. 2009, 33(12):1909–1918.
 34. *Lu J.Z.* Closing the gap between planning and control: A multiscale MPC cascade approach // Annual Reviews in Control. 2015, 40:3-13.
 35. *Mahalec V., Marlin T.* Real-time Optimization (RTO): Past, Present, Future / McMaster University.
 36. *Nath R., Alzein, Z.* Dynamic real-time optimization and process control of twin olefins plants at DEA Wesseling Refinery / In: Proceed. 13th annual ethylene producers conference, 2001. Houston, TX.
 37. *Shobry D.E., White D.C.* Planning, scheduling and control systems: why cannot they not work together // Computers & Chemical Engineering. 2002, 26(2):19-160.

38. *Christofides P. et al.* Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions // Computers & Chemical Engineering. 2013, 51(5): 21–41.
39. *Schutter B.D.* Distributed and Hierarchical MPC: Main Concepts and Challenges / HD-MPC Industrial Workshop, Leuven, 2011.
40. *Duncanson L., Youle P.* On-line control of olefin plant // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 1970, 51:49.
41. *Engell S.* Feedback control for optimal process operation // Journal of Process Control. 2007, 17(3): 203-219.
42. *Darby M. L. et al.* RTO: An overview and assessment of current practice // Journal of Process Control, 2011, 21(6):874-884.
43. *Nath R.* Real Time Optimization of an Industrial Power Plant / AIChE Spring, 2013. San Antonio, TX, paper # 23.
44. *Trierweiler J. O.* Real-Time Optimization of Industrial Processes / In: Encyclopedia of Systems and Control, 2014, pp.1-11.
45. *Dahlgren K., Terndrup H.* Modelling for ULSD optimisation // PTQ (Petroleum Technology Quarterly), Q2 2011, pp.111-118.
46. *Frank (Xin X.) Zhu.* Digitalization and Analytics for Smart Plant Performance: Theory and Applications – Wiley-AICHe, 2020. 544 p.9.

Dozoertsev V.M., Baulin E.S., Anosov A.A., Boronin A.B. Plant-wide optimization: a real opportunity or a distant future

The paper overviews the evolution of two prevalent classes of industrial automation systems: production optimization and advanced process control. It emphasizes the longstanding gap between those systems caused by the complexity of their synchronization because of basically different level of detail of plant description and the lack of the necessary algorithms and software for such synchronization. The plant-wide optimization approach is formulated, which closes the gap and enables production planning in closed loop by means of the selected optimal plan with the help of cascade advanced process control systems. Recent plant-wide optimization solutions from key industrial automation vendors are outlined.

Keywords: optimal production panning, scheduling, linear and successive linear programming, analytical design of controllers, advanced process control, model predictive control, cascaded MPC, plant-wide optimization.