

**Гибридные методы моделирования и  
управления сложными системами и их  
применение к объектам  
междисциплинарной природы**  
Отчёт и заявка молодёжной научной школы

Лаб. 40, ИПУ РАН, Москва, 2022

# Участники МНШ

**Пащенко Фёдор Фёдорович, д.т.н., проф., руководитель;**

Хижинская Лада Дмитриевна, м.н.с. лаб. 40 ИПУ РАН;

Куликов Артем Сергеевич, инженер, лаб. 40 ИПУ РАН, студент МЭИ;

Тордия Марк Джамбулович, м.н.с., лаб. 40 ИПУ РАН, аспирант ИПУ РАН.

---

Косой Анатолий Александрович, к.т.н., МЭИ;

Ягупова Юлия Юрьевна, аспирант МЭИ;

Нгуен Ван Чонг, аспирант МФТИ;

Буй Чыонг Ан, аспирант МФТИ;

Дуванов Евгений Сергеевич, аспирант ЛГТУ;

Чан Дык, аспирант МФТИ.

# Цели и задачи МНШ

## Этап 2021 – 2022

1. Реализация программной модели распределения ресурсов и их транспортировки на основе генетического алгоритма и эвристических подходов;
2. Исследование производительности и сходимости генетических алгоритмов при решении транспортных задач и задач распределения ресурсов на примере задачи производственного планирования в сельском хозяйстве;
3. Анализ и исследование методов моделирования оборудования энергоблоков теплоэлектростанций;
4. Разработка гибридных методов построения математических моделей слабоформализуемых систем.

Дополнительно решены:

5. Разработаны на основе нейронных сетей алгоритмы мониторинга и распознавания объектов городской инфраструктуры (парки, экологической обстановки и др.);
6. Рассмотрены вопросы создания интеллектуальных месторождений.

# Результаты

## Этап 2021 – 2022

1. Разработана и реализована программная модель распределения и транспортировки ресурсов для задачи построения графиков работ в сфере сельского хозяйства. Была исследована применимость данной модели, основанной на эвристических и метаэвристических алгоритмах в задачах планирования различной размерности и сложности;
2. Проведен анализ и даны рекомендации по выбору метода расчета оптимальных параметров настроек регуляторов при синтезе АСР котлов типа «ТГМП»;
3. Предложена энергоэффективная ресурсосберегающая интеллектуальная система управления процессами добычи газа;
4. Изучена структура нечетких систем, искусственных нейронных сетей и моделей. Предложен алгоритм синтеза нечеткой модели на основе многомерных гауссовских функций принадлежности. Предложен алгоритм метода выполнения быстрого структурно-параметрического описания;
5. Проведен структурный анализ нечетких моделей, нейронных сетей и их ассоциативных моделей. Предложена архитектура нейро-нечеткой модели на основе многомерных функции принадлежности.

# Результаты

## Участие в научных мероприятиях

- XVII Всероссийская школа-конференция молодых ученых Управление большими системами, Москва, 6-9 сентября 2021;
- Международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD` 2021), 27-29 сентября 2021 г., Москва;
- III Международная научно-практическая конференция «Системы управления, математическое моделирование, автоматизация и энергоэффективность» SUMMA2021, 10-12 ноября 2021 г., г. Липецк;
- 12th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies, ANT 2021 / 4th International Conference on Emerging Data and Industry 4.0, EDI40 2021;
- 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON);
- 7th International Conference on Machine Learning, Optimization, and Data Science (LOD), 4-8 October, Grasmere, United Kingdom.

## Участие в грантах и ограммах РАН и прочих ведомств

- Грант РФФ №19-19-00601

# Результаты

## Список публикаций участников МНШ

1. Arakelyan E.K., Andryushin A.V., Mezin S.V., Pashchenko F.F., Kosoy A.A., Yakubova Yu.Yu. Problems of Optimizing the Modes of CHP with a Complex Composition of Equipment, Taking into Account the Peculiarities of the CCGT and Steam Power Units Operation / IFAC-PapersOnline. Moscow: Elsevier, 2021. Volume 54, Issue 13. C. 268-273;
2. Arakelyan E.K., Kosoy A.A., Andryushin A.V., Mezin S.V., Yagurova Yu.Yu., Leonov V.M., Pashchenko F.F. Problems of Increasing the Intelligence of Algorithms for Optimal Distribution of the Current Load on the Combined Heat and Power Plant and Ways to Solve Them // Advances in Science, Technology and Engineering Systems. 2021. Volume 6, Issue 5. C. 369-374;
3. Arakelyan E.K., Mezin S.V., Pashchenko F.F., Kosoy A.A. Possibilities and Problems of Station-Level Optimization Algorithms Integration into the Application Software of Program and Technical Complexes of Intelligent Automated Control Systems of TPP / IFAC-PapersOnline. Moscow: Elsevier, 2021. V.54 Issue 13. C. 75-80;
4. 4. Nguyen V.Ch., Pashchenko F.F., Le D.T., Vu C.C. Convolutional Neural Network for Convolution of Aerial Survey Images / IFAC-PapersOnLine. Moscow: Elsevier, 2021. Volume 54, Issue 13. C. 588-592;
5. 5. Pikina G.A., Arakelyan E.K., Pashchenko F.F., Filippov G.A. Developing Models of Turbine Thermal Processes in Low-Steam and Motor Modes / Thermal Engineering. Moscow: Pleiades Publishing, 2021. v.68, No.8. C. 612-618;

# Результаты

## Список публикаций участников МНШ

6. Arakelyan E.K., Kosoy A.A., Mezin S.V., Pashchenko F.F. Application of the basic principles of "Industry 4.0" in the intellectualization of automated control systems of modern thermal power plants / Procedia Computer Science. Warsaw, Poland: Elsevier, 2021. Vol.184. С. 865-870;
7. Arakelyan E.K., Pashchenko F.F., Mezin S.V., Andryushin A.V., Kosoy A.A. Increasing the Intelligence of the Automated Process Control System by Managing the Current Energy Indicators of the TPP Equipment / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600150>;
8. Duvanov E.S., Duvanova V.S., Kudinov Yu.I., Pashchenko F.F. Analysis of the Technological Process of Egg Incubation and Formulation of the Control Problem / Proceedings of the 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA2021, Lipetsk). Lipetsk: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9649197>;
9. Mezin S.V., Kosoy A.A., Pashchenko F.F., Kudinov Yu.I. Integration of optimization algorithms into the software of modern program and technical complexes / Proceedings of the 14th International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD). Moscow: IEEE, 2021. С. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9600189>;

# Результаты

## Список публикаций участников МНШ

10. Nguyen V.T., Pashchenko F.F. Development of an object recognition algorithm based on neural networks with using a hierarchical classifier / *Procedia Computer Science*. Warsaw: Elsevier B.V, 2021. v.184 . С. 438–444;
11. Pashchenko F.F., Pashchenko A.F., Kudinov Yu.I., Kudinov I.Yu., Duvanov E.S., Pikina G.A. Adaptive Models in Decision-making Systems / *Proceedings of the 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA2021, Lipetsk)*. Липецк: IEEE, 2021. С. 778-781 <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9632021>;
12. Pikina G.A., Pashchenko F.F., Pashchenko A.F. Synthesis of a time-optimal control system for an extremal object / *Journal of Physics: Conference Series*. Bristol: IOP Publishing, 2021. Vol. 2090. С. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2090/1/012011/meta>;
13. Pham T.A., Bui C.A., Nguyen V.C., Nguyen H.T., Pashchenko F.F., Pashchenko A.F. Optimization of Model Parameters by Complex Probabilistic Criteria / *Proceedings of the 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Казань: IEEE, 2021. С. 1-4;
14. G.A. Pikina, A.F. Pashchenko, A.S. Kulikov. Developing a Method for Determining the Dynamic Characteristics of Heat Exchangers with Cross-Flowing Stream / *IFAC-PapersOnline*. (принято к публикации CPES 2022).



# Результаты

## Статьи в журналах/сборниках из перечня ВАК

1. Аракелян Э.К., Пащенко Ф.Ф., Косой А.А., Мезин С.В., Васильев Е.Д. Методические положения по использованию прогностических алгоритмов при решении общестанционных оптимизационных задач // Датчики и Системы. 2021. № 6. С. 19-24;
2. Дуванов Е.С., Кудинов Ю.И., Кудинов И.Ю., Пономарев А.А., Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф. Сравнительный анализ модифицированной системы MRAC-MIT и системы MRAC-Ляпунова // Информатика и системы управления. 2021. № 1(67). С. 31-43;
3. Пикина Г.А., Аракелян Э.К., Пащенко Ф.Ф., Филиппов Г.А. Разработка моделей тепловых процессов турбины в малопаровых и моторных режимах // Теплоэнергетика. 2021. №8. С. 26-32;
4. Хижинская Л.Д., Пащенко А.Ф. Обзор практических решений применения цифровых технологий для управления городом / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 744-752;

# Результаты

## Статьи в журналах/сборниках из перечня ВАК

5. Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Лясковская И.В. Умный город Москва // Датчики и системы. 2022. №1. С. 48-58;
6. Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Тордия М.Д., Лясковская И.В. Умный город Москва. Часть 2 // Датчики и системы. 2022. №2. С. ;
7. Гуляев С.В., Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Кудинов Ю.И. Ресурсосберегающая система управления добычей газа с адаптивным ПИД регулятором с максимизацией уровня давления газа в коллекторе // Датчики и системы. 2022. №2. С. ;
8. Куликов А.С., Пикина Г.А. Разработка моделей парогенератора блока БН-600 / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 545-555;
9. Тордия М.Д., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д. Поиск оптимального расписания в задаче планирования сельскохозяйственного производства // Датчики и системы. 2022. №3. С. .

# Результаты

## Патенты и авторские свидетельства

1. Пащенко Ф. Ф., Буй Чыонг Ан. Программа синтеза системы нечеткого вывода на основе многомерных гауссовских функций принадлежности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022613701 РФ; Зарег. 15.03.2022;
2. Пащенко Ф. Ф., Нгуен В.Ч. Программа распознавания объектов на аэроснимках на основе сверточной нейронной сети. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667818 РФ; Зарег. 02.11.2021.

## Количество публикаций

- Web of Science & Scopus — 14;
- РИНЦ — 9;
- Патенты и авторские свидетельства — 2.

# Заявка на поддержку МНШ

## Ожидаемые результаты второго года

1. Реализация программной модели распределения ресурсов и их транспортировки на основе нейронной сети (обучение с подкреплением);
2. Исследование производительности и сходимости алгоритмов на основе нейронных сетей при решении транспортных задач и задач распределения ресурсов на примере задачи производственного планирования в сельском хозяйстве;
3. Анализ и сравнение результатов работы моделей на основе генетического алгоритма и нейронной сети;
4. Математическое моделирование теплового оборудования энергоблоков типа БН-600;
5. Разработка методов построения гибридных моделей на основе аналитических и интеллектуальных методов для производственных и организационных и социально-экономических систем;
6. Разработка нечетких регуляторов для увеличения быстродействия и минимизации среднеквадратических ошибок;
7. Разработка и использование гибридных регуляторов в системах принятия решений.
8. Обязательства по публикациям:
  - Web of Science, Scopus и RSCI — 8;
  - РИНЦ — 6.

# **Модель распределения и транспортировки ресурсов**

**Задачи и результаты**

**Тордия М.Д., м.н.с., лаб. 40, ИПУ РАН.**

# Решаемая задача

## Формулировка

Решается задача создания модели способной осуществлять поиск оптимального графика выполнения работ в сфере сельского хозяйства с учётом специфики отрасли.

### Особенности решаемой задачи:

- NP-сложность,
- Большая размерность,
- Двойной сетевой граф (транспортировка + зависимость работ),
- Характерные для сельскохозяйственной отрасли условия и ограничения.

### Специфика сельскохозяйственной отрасли:

- Параллельное выполнение одной работы несколькими исполнителями,
- Непрерывность выполнения работ,
- Наличие агрономических сроков,
- Условия предшествования работ.

# Решаемая задача

## Актуальность и новизна

1. Цифровизация и автоматизация процессов производства;
2. Дитализация процессов производства вплоть до уровня отдельных полей и исполнителей;
3. Оптимизация цифровой модели произва на различных уровнях детализации в зависимости от доступных вычислительных и временных ресурсов.

## Эффекты:

- Сокращение расходов производства,
- Увеличению прибыли и сбора с/х продукции,
- Оптимизация парка техники в зависимости от потребности,
- Оптимизация штата сотрудников.

# Решаемая задача

## Целевая функция

В качестве целевой функции для задачи оптимизации выступает функция чистой прибыли. В решаемой задаче чистая прибыль ( $P$ ) состоит из:

- Прибыли от собранной в срок продукции ( $E$ ),
- Расходов на перемещение ( $M$ ),
- Расходов на выполнение работ ( $W$ ).

$$P = E - W - M$$

С помощью предложенной модели решается задача максимизации чистой прибыли:

$$P \rightarrow \max$$

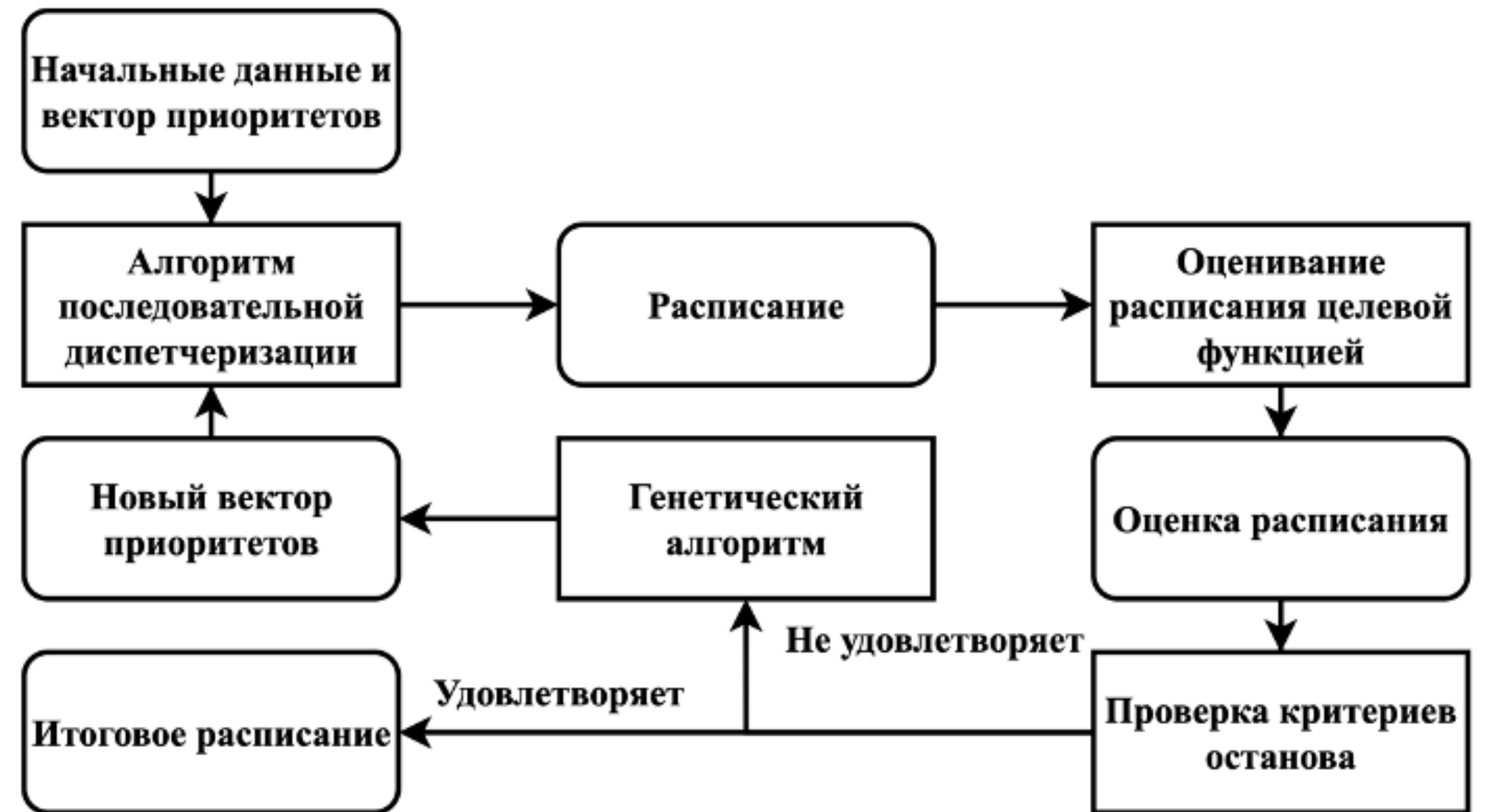
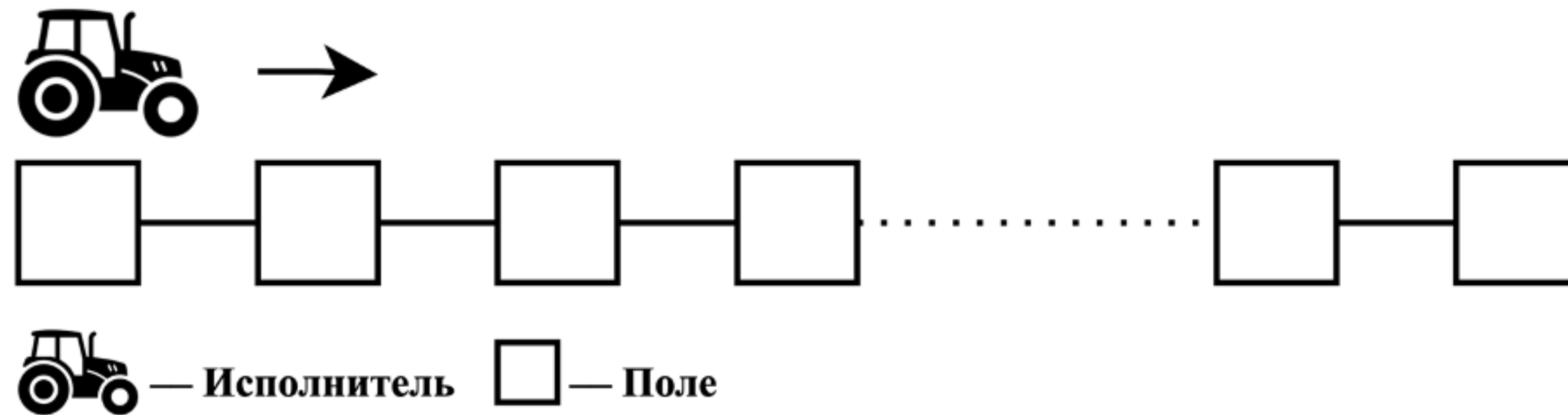


Схема работы предложенной модели



# Полученные результаты

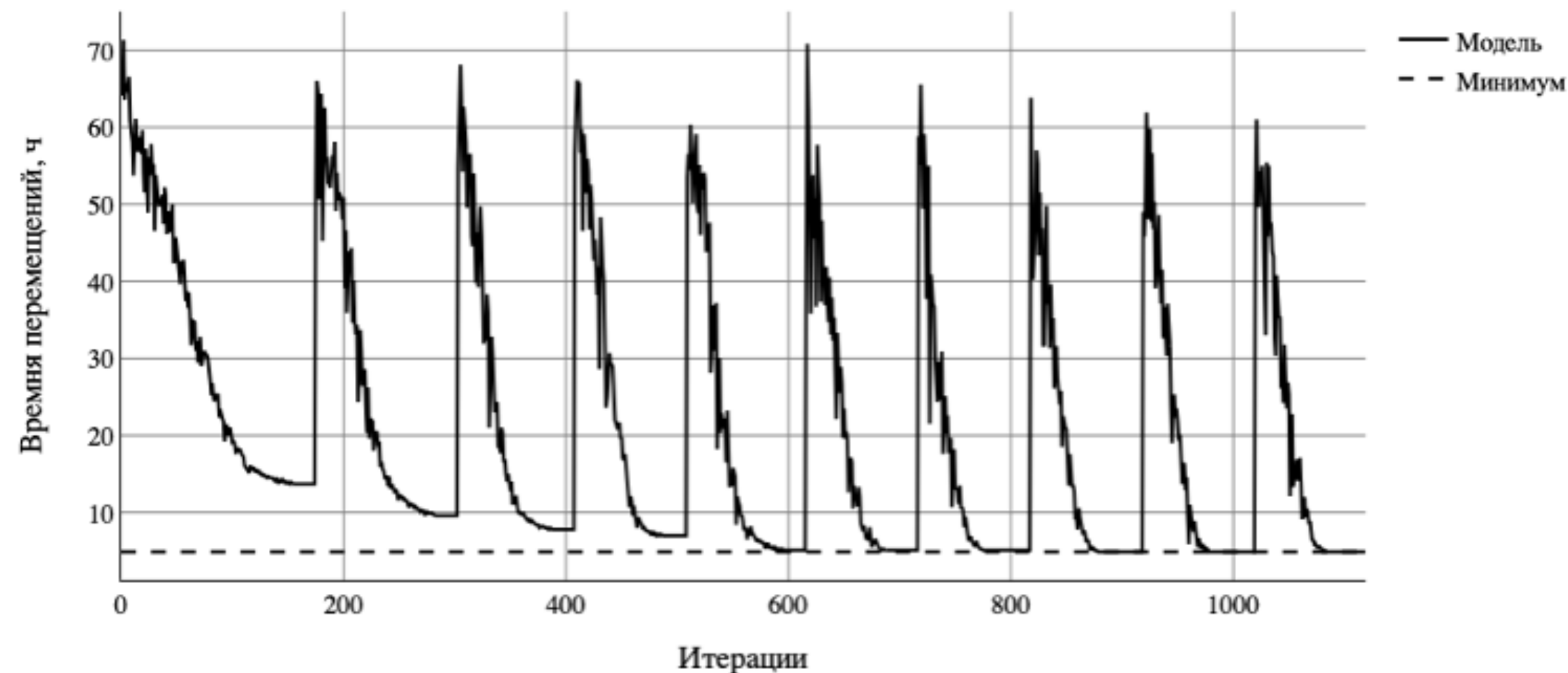


## Размерность задачи:

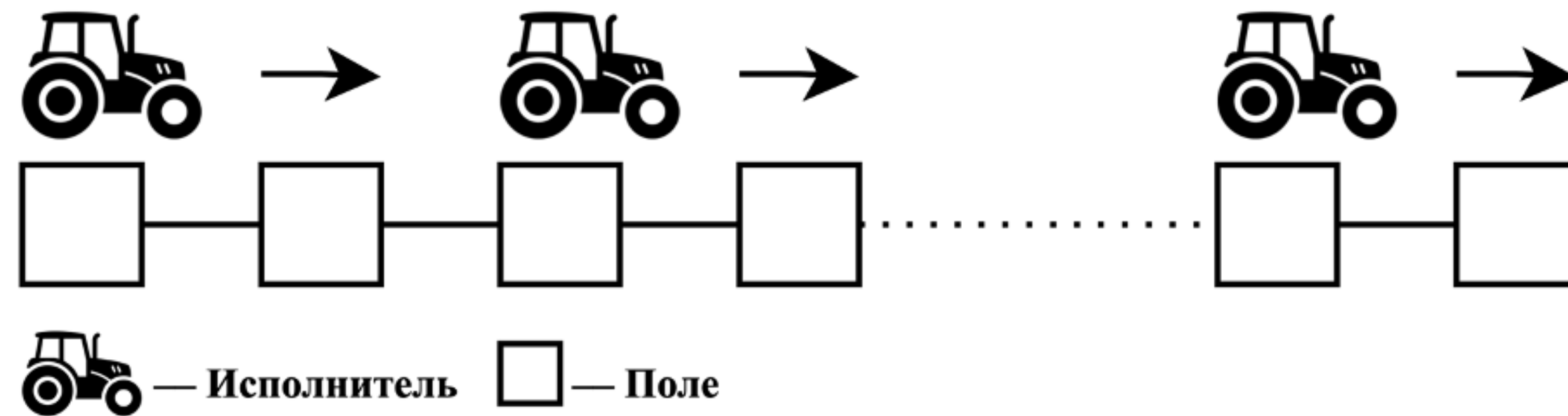
- 1 исполнителей,
- 50 полей и работ,
- 50 пар работа-исполнитель.

## Эффект:

- Минимум достигнут уже на 5 запуске модели (в районе 600-го поколения).

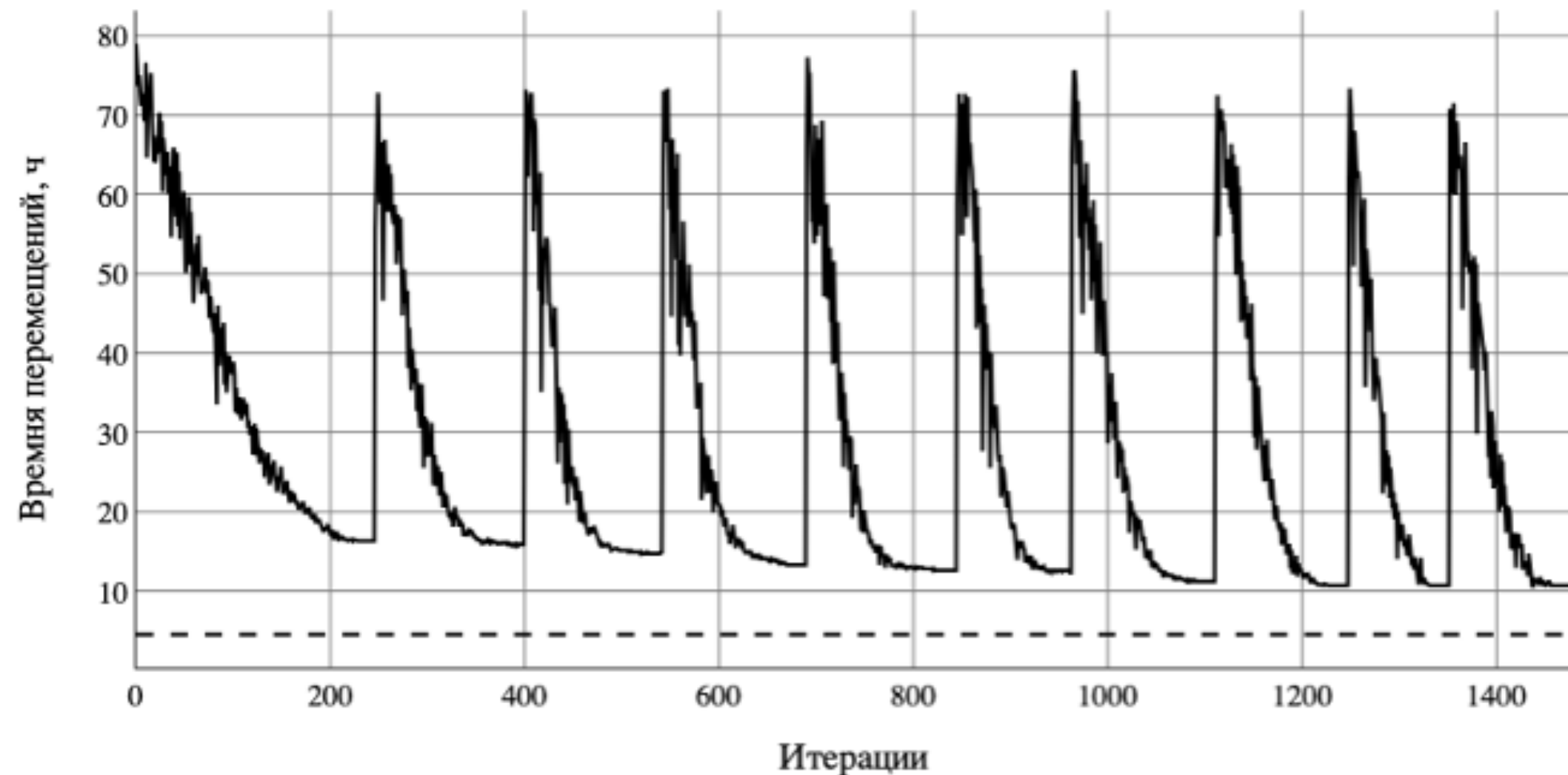


# Полученные результаты



## Размерность задачи:

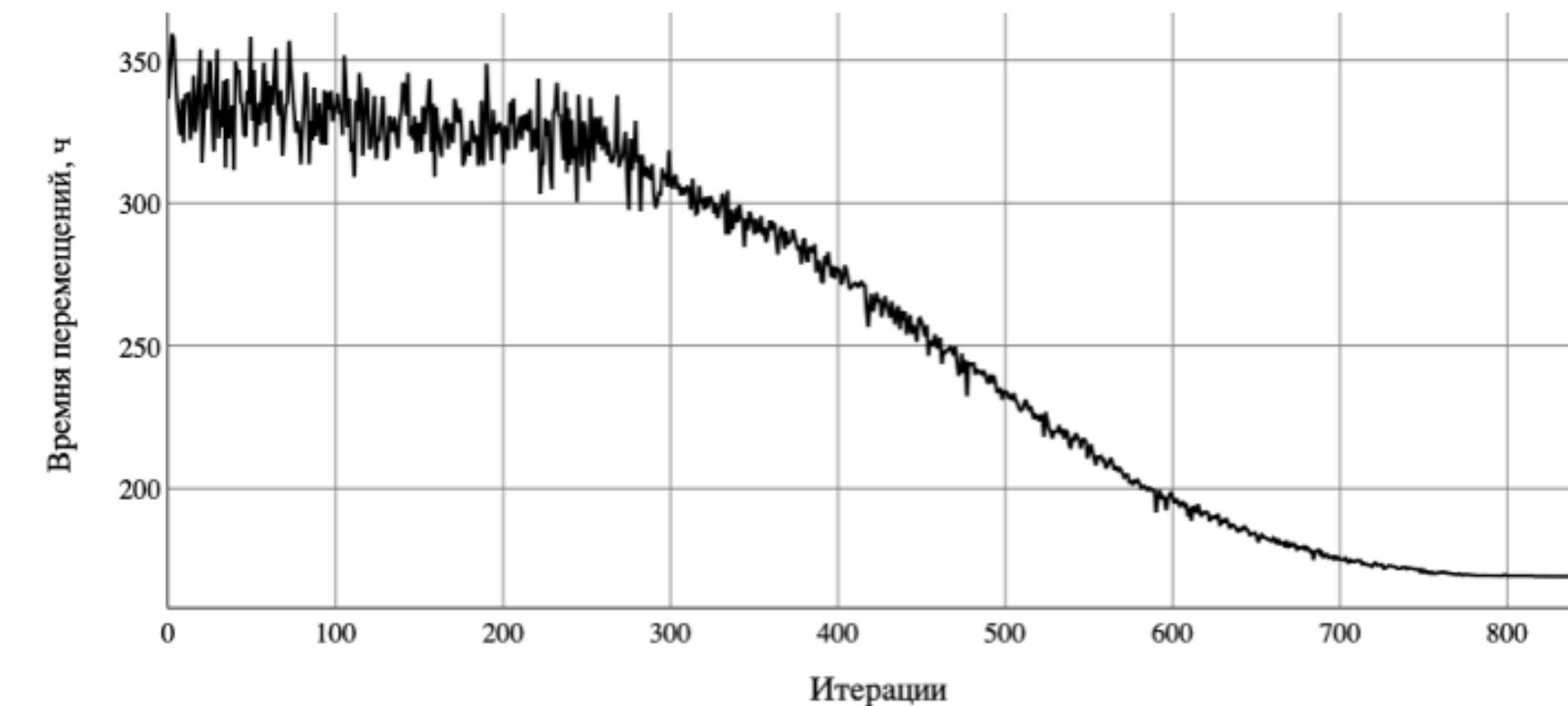
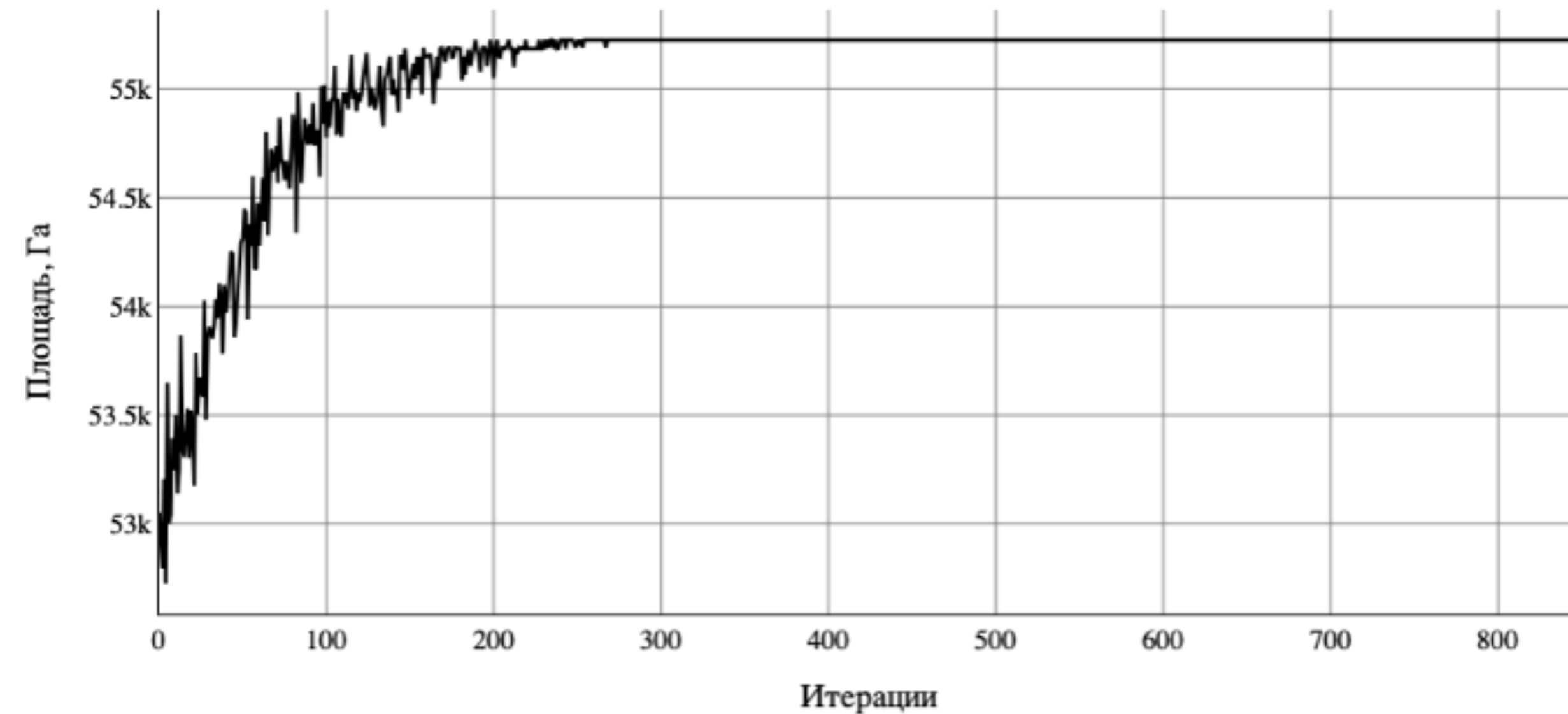
- 5 исполнителей,
- 50 полей и работ,
- 250 пар работа-исполнитель.



## Эффект:

- За 10 запусков (1500 поколений) минимум не достигнут, но каждый запуск приводил к улучшению.

# Полученные результаты



## Размерность задачи:

- 158 различных исполнителей,
- 204 поля,
- 575 работ,
- ~3000 пар работа-исполнитель.

## Эффект:

- Время перемещений: -80%
- Выполненная площадь: + 4%

# Полученные результаты

## Этап 2021 – 2022

- Разработана и реализована программная модель распределения и транспортировки ресурсов для задачи построения графиков работ в сфере сельского хозяйства на основе генетического алгоритма;
- Исследована применимость данной модели в задачах планирования различной размерности и сложности.


## Публикации:

1. Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Тордия М.Д., Лясковская И.В. Умный город Москва. Часть 2 // Датчики и системы. 2022. №2. С. 54-63;
2. Тордия М.Д., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д. Поиск оптимального расписания в задаче планирования сельскохозяйственного производства // Датчики и системы. 2022. №3. (в печати) .

# Цели на второй год

## Этап 2022 – 2023

1. Реализация программной модели распределения ресурсов и их транспортировки на основе нейронной сети (обучение с подкреплением);
2. Исследование производительности и сходимости алгоритмов на основе нейронных сетей при решении транспортных задач и задач распределения ресурсов на примере задачи производственного планирования в сельском хозяйстве;
3. Анализ и сравнение результатов работы моделей на основе генетического алгоритма и нейронной сети.

The image shows an industrial gas production site. In the foreground, there is a large, vertical, white cylindrical pressure regulator with several horizontal pipes connected to it. To the left, there is a green metal structure with a red handwheel. In the background, there is a green fence, a field, and a blue sky with some clouds. The text is overlaid on the image in white with a black outline.

# Система управления добычей газа с адаптивным ПИД регулятором с максимизацией уровня давления газа в коллекторе

Задачи и результаты

Хижинская Л.Д., м.н.с., лаб. 40, ИПУ РАН.

# Решаемая задача

Решается задача максимизации давления газа в коллекторе в случаях выхода на минимальные расходы скважин, допускаемые технологической картой. Предлагается энергоэффективная ресурсосберегающая интеллектуальная система управления процессами газодобычи. Система обеспечивает стабилизацию давления в общем коллекторе куста газовых скважин при изменении в широких пределах физико-технических параметров добычи газа. Для решения поставленной задачи разработан адаптивный ПИД-регулятор с управляемой частотой управляющего сигнала значительно повышающий ресурс технических средств управления.

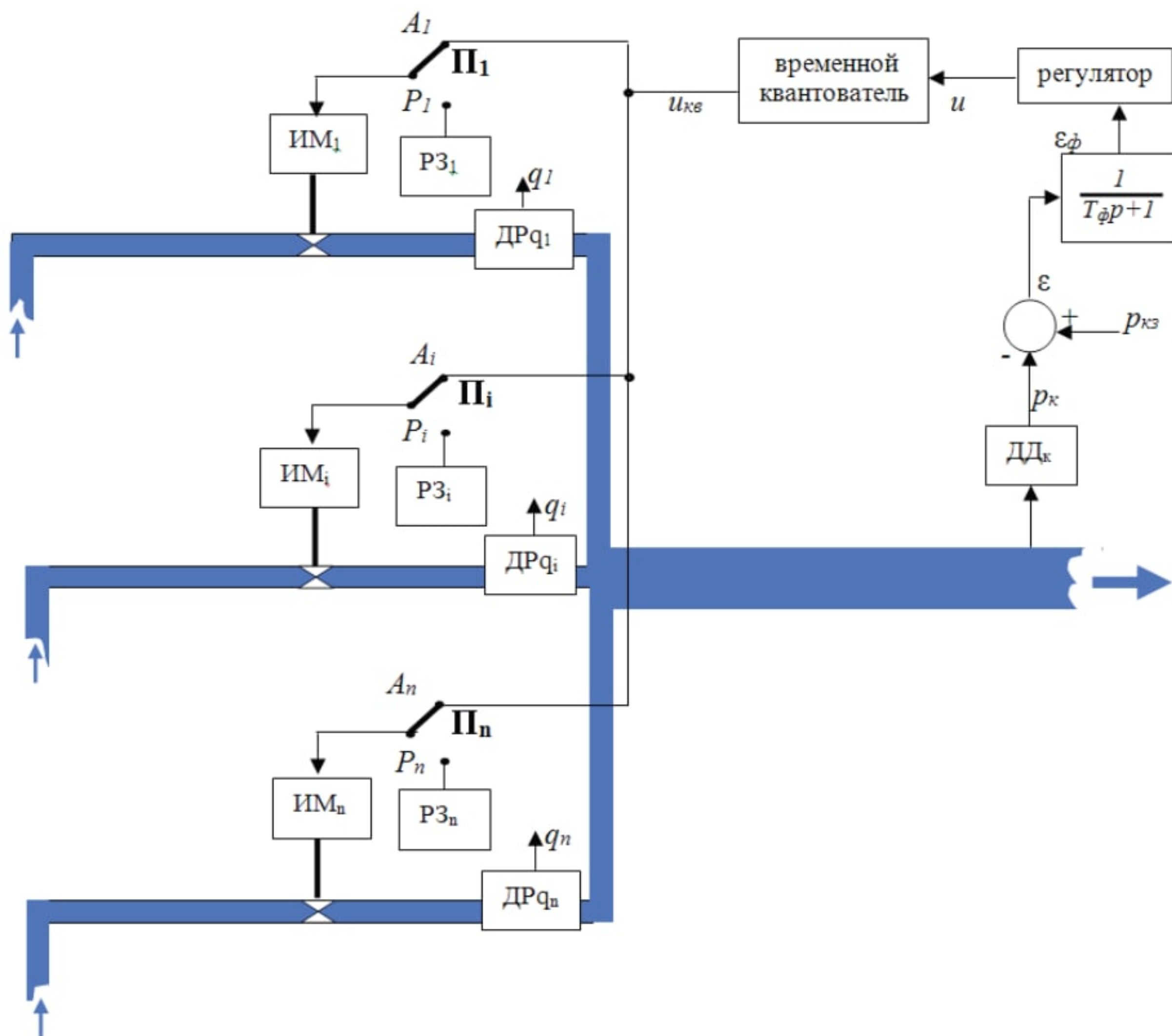
# Специфические проблемы связанные с добычей газа:

- Значительное снижение пластового давления на стадии отбора газа более 80-85% от начальных извлекаемых запасов;
- Увеличение относительной доли запасов остаточного газа, расположенных в слабо дренируемых и не дренируемых зонах;
- Подъем газа-водяного контакта и внедрение краевых вод, что приводит к преждевременному обводнению газовых залежей;
- Рост числа скважин, работающих в режиме самозадавливания, из-за недостатка пластовой энергии для выноса скоплений воды и конденсата из прискважинных зон и жидкости из ствола газовой скважины;

Предлагаемая система управления обеспечивает минимизацию числа включений механических исполнительных органов, значительно увеличивая их ресурс.



# Адаптивная схема управления газодобычей



ИМ<sub>i</sub> (i=1,...,n) – пропорциональный исполнительный механизм клапана i-ой газовой скважины;

ДРq<sub>i</sub> (i=1,...,n) - датчик расхода газа i-ой газовой скважины;

q<sub>i</sub> (i=1,...,n) – расход газа i-ой газовой скважины;

ДДк – датчик давления газа куста газодобывающих скважин;

p<sub>к</sub> - значение давления газа куста газодобывающих скважин;

p<sub>кз</sub> – заданная величина давления газа куста газодобывающих скважин;

PЗ<sub>i</sub> (i=1,...,n) – задатчик положения ИМ<sub>i</sub> для ручного управления i-ой газовой скважины;

П<sub>i</sub> (i=1,...,n) – переключатель режима управления i-ой газовой скважины.

П<sub>i</sub> (i=1,...,n) – переключатель режима управления i-ой газовой скважины.

$$U_{\text{ПИДкв}}(t) = \begin{cases} u_{\text{пид}}(t_i) = k_{\text{п}}(\varepsilon(t_i) + k_{\text{и}} \int_0^{t_i} \varepsilon(\tau) d\tau + k_{\text{д}} \varepsilon'(t_i)) \text{ при } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ u_{\text{пид}}(t_{i+1}) = k_{\text{п}} \left( \varepsilon(t_{i+1}) + k_{\text{и}} \int_0^{t_{i+1}} \varepsilon(\tau) d\tau + k_{\text{д}} \varepsilon'(t_{i+1}) \right) \text{ при } t = t_{i+1} \end{cases}$$

# Алгоритмы управления кустом газодобывающих скважин

Часть исполнительных механизмов количеством  $\tilde{n}$ , управляемых центральным регулятором, задается неравенством

$$q_{min} < q_i < q_{max}, i = 1, \dots, \tilde{n}, \tilde{n} \leq n \quad (1)$$

Поиск максимально возможного давления  $p_k$  осуществляется принудительным увеличением задания  $p_{кз}$  давления газа в коллекторе.

В начале такого увеличения  $p_{кз}$  все неравенства (1) выполнялись ( $\tilde{n} = n$ ), то начиная с некоторого значения  $p_{кз} = p_{кз0}$ , расходы  $q_i$  одной или нескольких скважин могут стать такими, что неравенство (1) выполняться не будет.

Будут справедливы неравенства.

$$q_i < q_{min}, i = 1, \dots, m_1 \quad m_1 - \text{количество скважин расходы которых меньше минимально допустимых} \quad (2)$$

$$q_i > q_{max}, i = 1, \dots, m_2 \quad m_2 - \text{количество скважин расходы которых больше максимально допустимых} \quad (3)$$

$$m_1 + m_2 = n - \tilde{n}.$$

$$q_i \approx q_{min}, i = 1, \dots, m_1 \text{ и } q_i \approx q_{max}, i = 1, \dots, m_2 \quad (4)$$

Такое требование можно выполнить, если исполнительные механизмы  $\tilde{n}$  скважин будут управляться общим сигналом  $U_{пид}(t)$ , а исполнительные механизмы оставшихся скважин будут управляться в автономном режиме, выполняя требование (4).

# Алгоритмы управления кустом газодобывающих скважин

Закон поиска максимального значения давления  $p_{кзmax}$  в данном случае можно представить в следующем виде

$$p'_{кз} = \begin{cases} k_+ \text{ при } \max\left(0.5(\text{sign}(-q_i + q_{min}) + 1), 0.5(\text{sign}(u_{ПИДа} - 0.94) + 1)\right) = 0 \\ 0 \text{ при } \max\left(0.5(\text{sign}(-q_i + q_{min} + \delta_{min}) + 1), 0.5(\text{sign}(u_{ПИДа} - 0.94) + 1)\right) = 1 \\ k_- \text{ при } \max\left(0.5(\text{sign}(-q_i + q_{min}) + 1), 0.5(\text{sign}(u_{ПИДа} - 0.98) + 1)\right) = 1 \end{cases}$$

Поиск максимально возможной величины  $p_{кз} = p_{кзmax}$  осуществляется интегрирующим звеном  $p'_{кз}$  которое может принимать одно из трех значений:  $k_+ > 0$ ,  $0$ ,  $k_- < 0$ .

Возрастание  $p_{кз}$  происходит при выполнении условия (1) и

$$u_{имi}(t) < 1, i = 1, \dots, n \quad - \text{ сигнал управления исполнительным механизмом } i \text{-ой скважины} \quad (5)$$

Если в (5) одно из неравенств перестает выполняться, рост  $p_{кз}$  прекращается и  $p'_{кз} = 0$ .

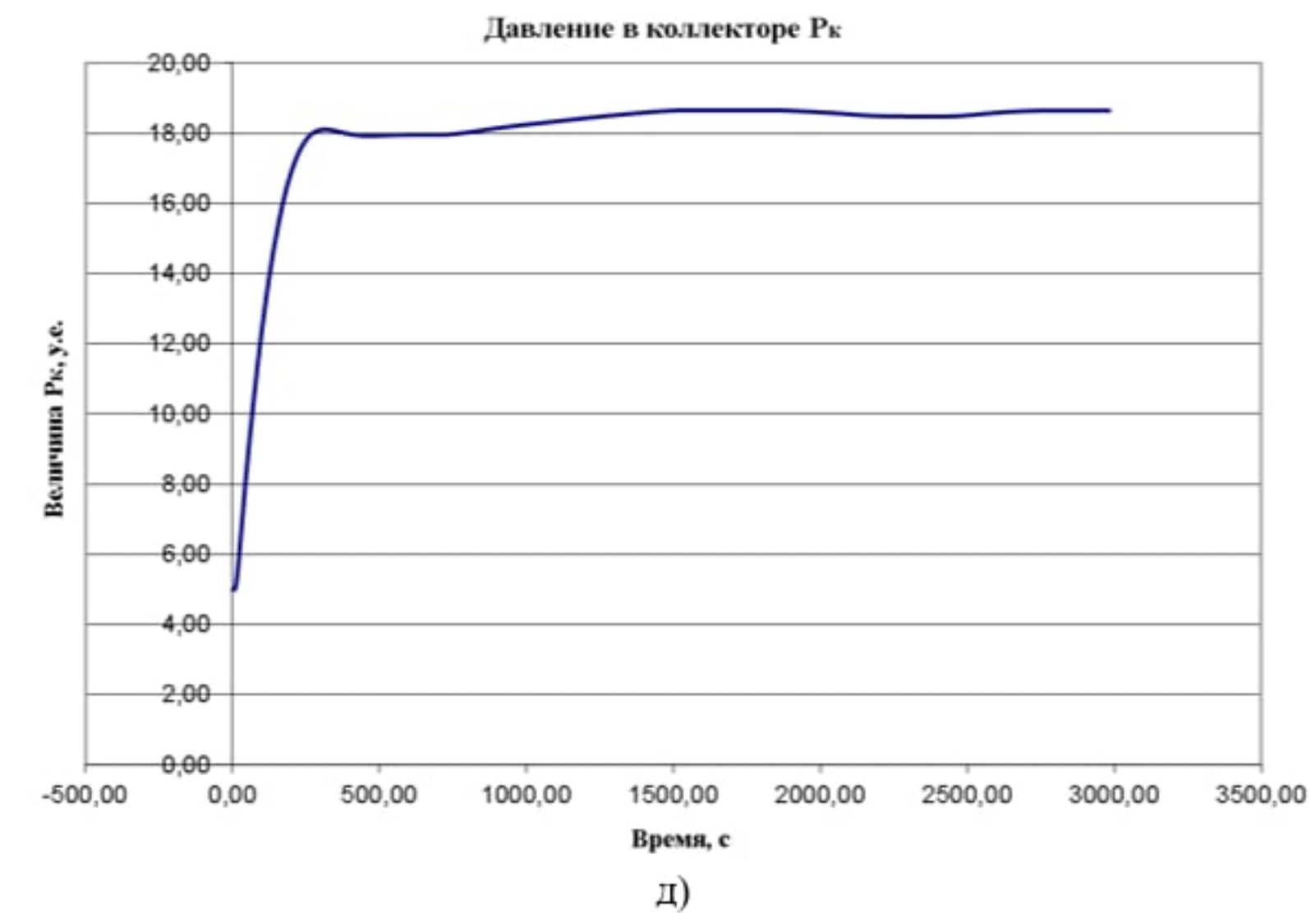
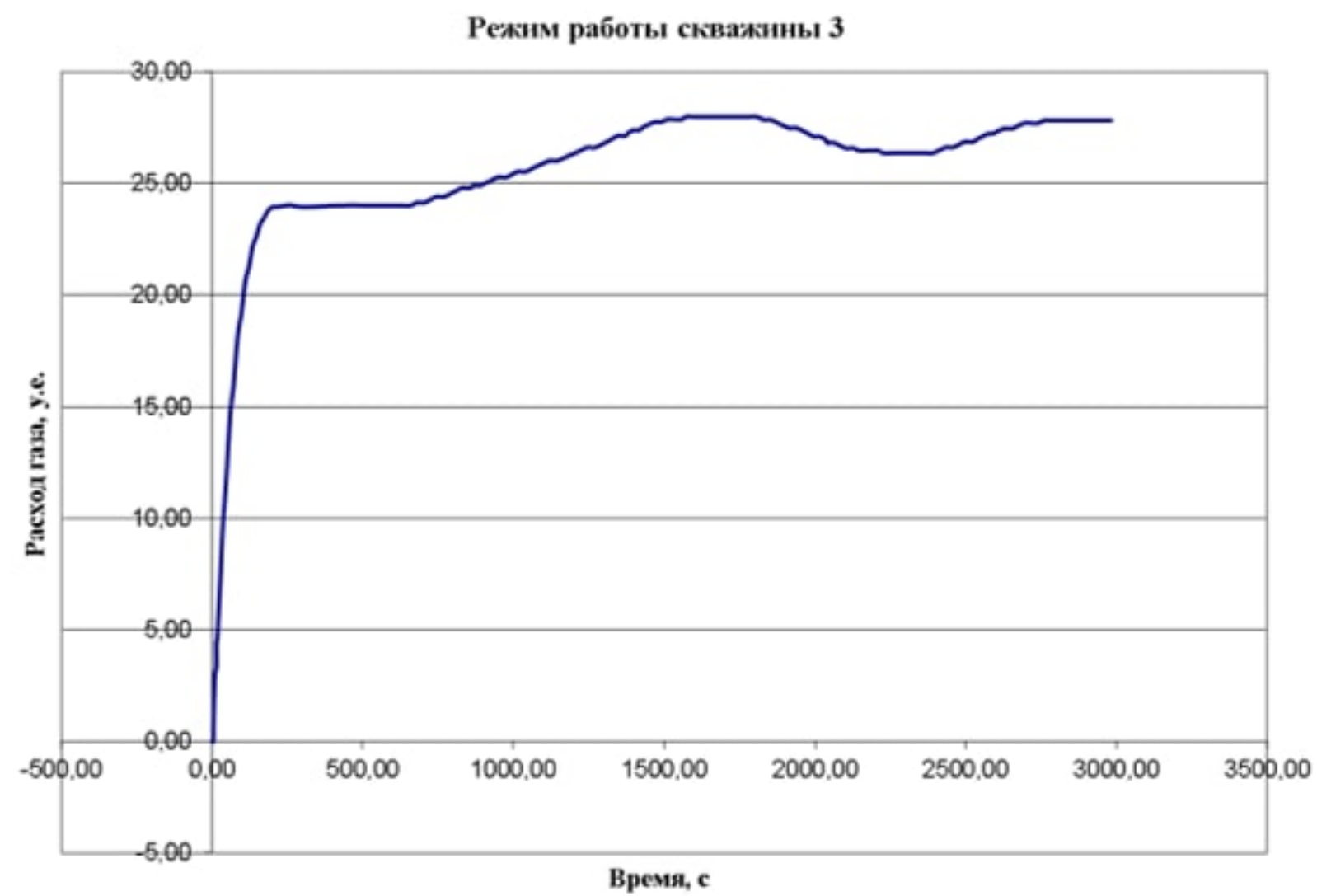
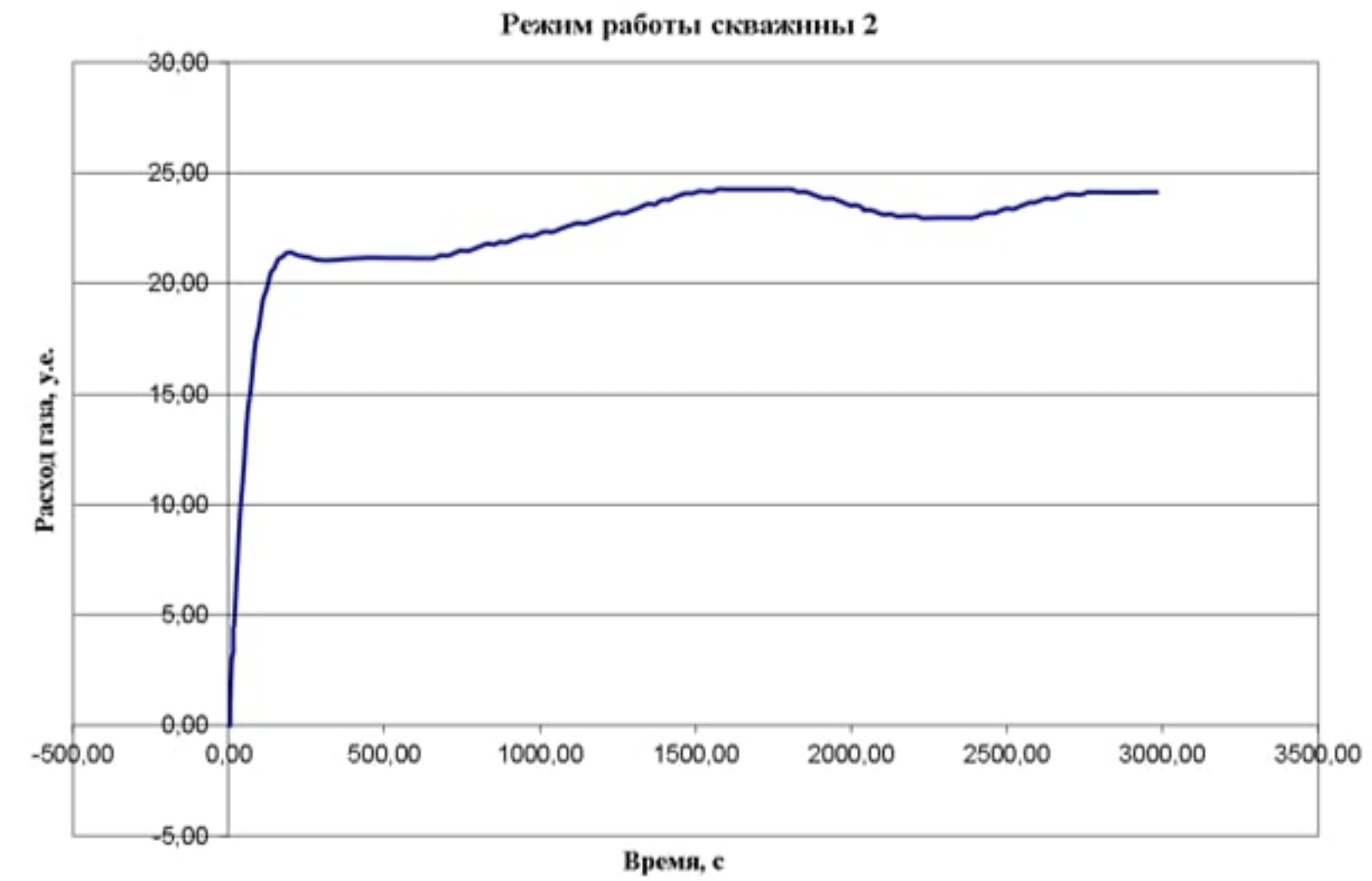
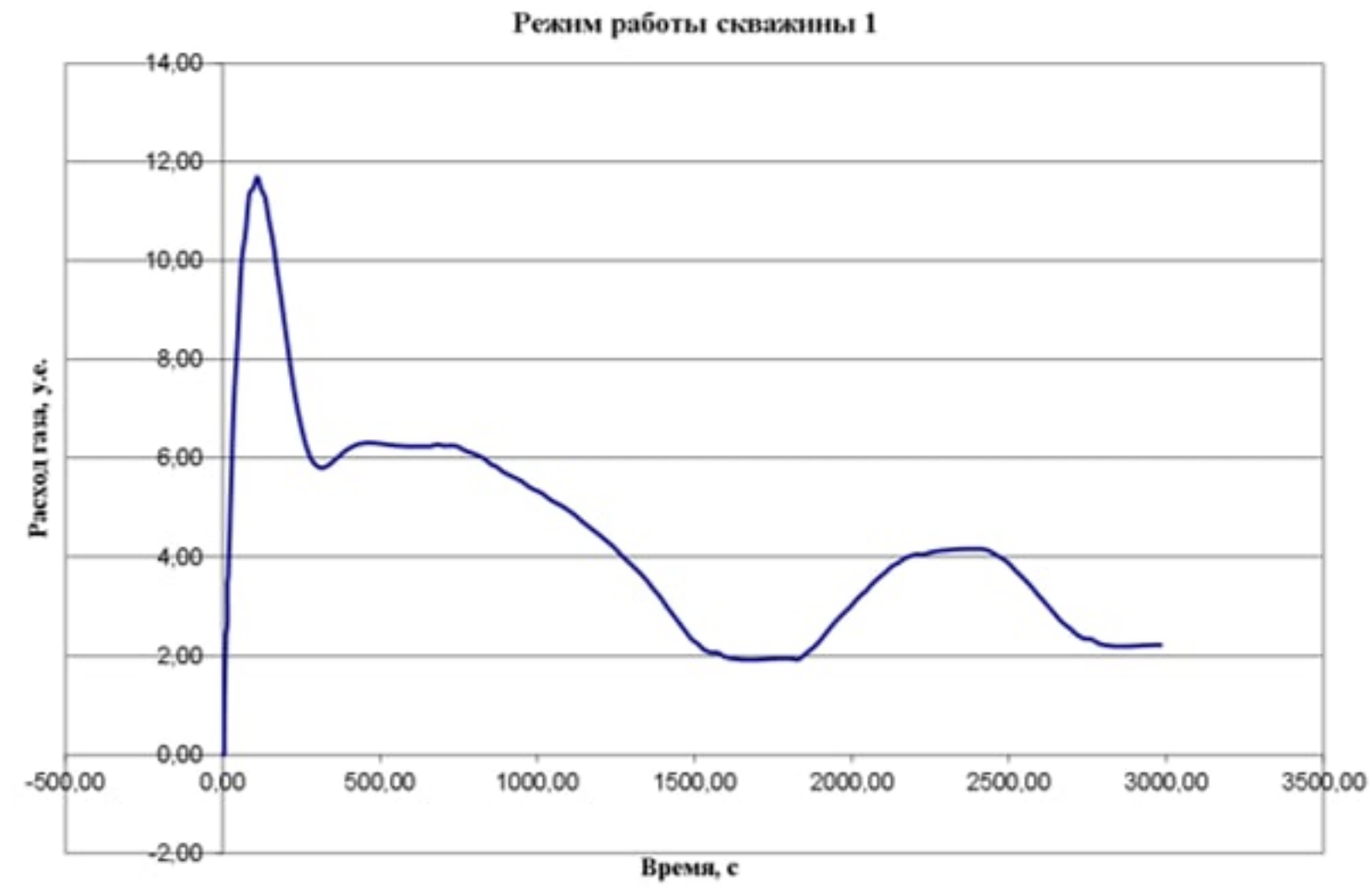
Другим условием прекращения роста  $p_{кз}$  является уменьшение расхода  $q_i$  на какой либо скважине до критического уровня  $q_{min}$ .

В процессе эксплуатации куста скважин величина максимально возможного давления уменьшается, и найденное значение  $p_{кз} = p_{кзmax}$  становится недопустимым. Это приводит к тому, что в системе управления возникает ошибка регулирования

$$\varepsilon(t) = p_{кз} - p_{к}(t) > 0 \quad (6),$$

которую невозможно компенсировать ограниченным сигналом управления  $0 \leq u_{ПИДа}(t) \leq 1$ . В этом случае найденное значение  $p_{кз} = p_{кзmax}$  следует уменьшать до полной компенсации ошибки регулирования, т.е.  $p'_{кз} = k_- < 0$ .

# Моделирование процесса поиска максимального давления



# Публикации

1. Хижинская Л.Д., Пащенко А.Ф. Обзор практических решений применения цифровых технологий для управления городом / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 744-752;
2. Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Лясковская И.В. Умный город Москва // Датчики и системы. 2022. №1. С. 48-58;
3. Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Тордия М.Д., Лясковская И.В. Умный город Москва. Часть 2 // Датчики и системы. 2022. №2. С. 54-63;
4. Гуляев С.В., Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д., Кудинов Ю.И. Ресурсосберегающая система управления добычей газа с адаптивным ПИД регулятором с максимизацией уровня давления газа в коллекторе // Датчики и системы. 2022. №2. С. 3-9;
5. Тордия М.Д., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д. Поиск оптимального расписания в задаче планирования сельскохозяйственного производства // Датчики и системы. 2022. №3 (в печати).

# Цели на второй год

Этап 2022 – 2023

1. Система управления добычей газа с гибридными регуляторами для оптимизации режимов работы куста газовых скважин;
2. Разработка алгоритмов ресурсосберегающего управления газовыми скважинами;
3. Разработка методов построения гибридных моделей на основе аналитических и интеллектуальных методов для производственных и организационных и социально-экономических систем.

# **Анализ влияния запаса устойчивости на качество регулирования АСР**

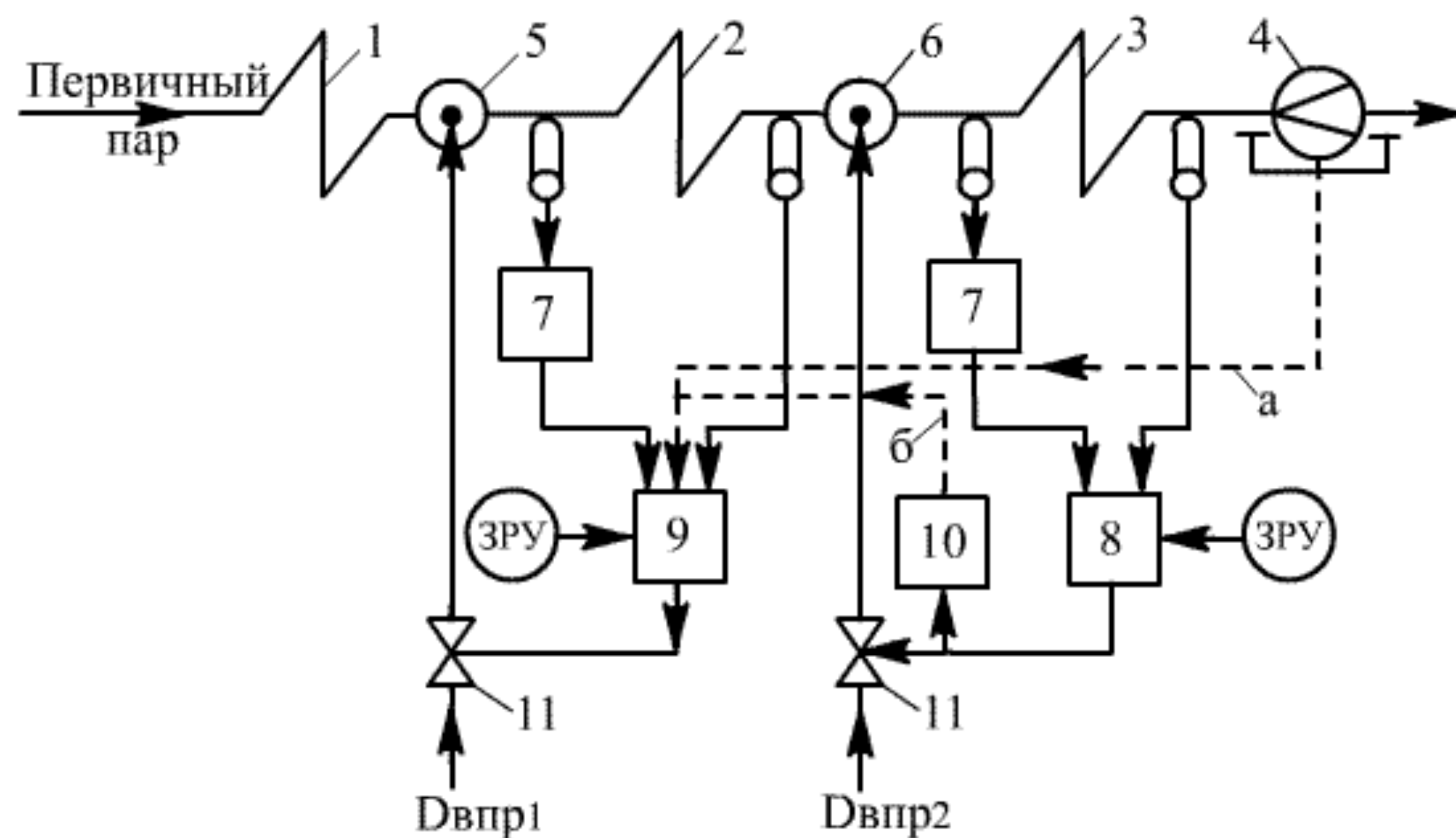
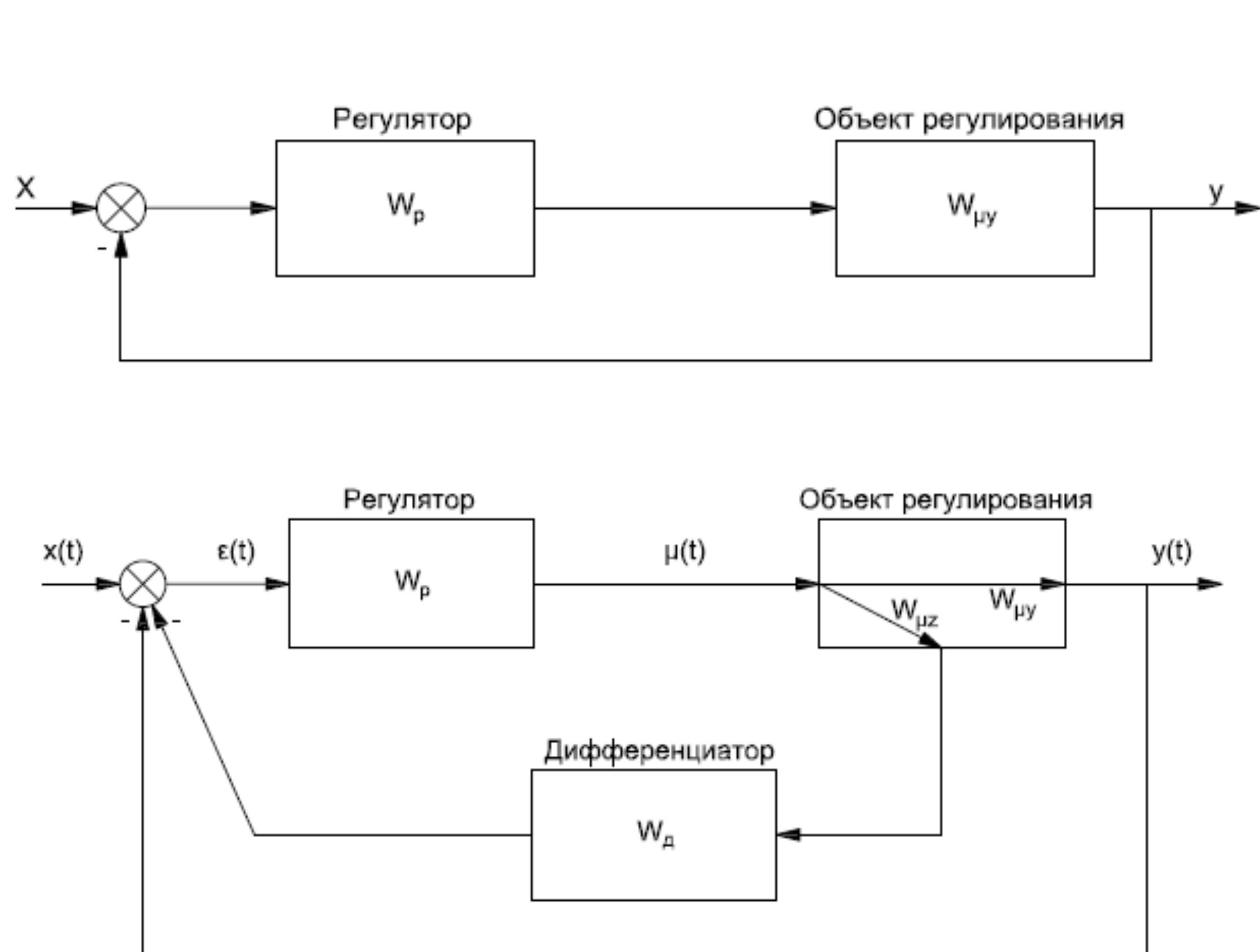
**Задачи и результаты**

**Куликов А.С., инженер лаб. 40, ИПУ РАН, студент 1 курса магистратуры НИУ "МЭИ".**

# Решаемая задача

## Сравнение методов настройки регуляторов

Для сравнения двух разных методов расчета оптимальных параметров настройки регуляторов проведен синтез одноконтурных систем регулирования с типовыми ПИ и ПИД алгоритмами регулирования.





# Полученные результаты

## Одноконтурная АСР с ПИ-регулятором при ограничении на частотный показатель колебательности М

Выражение вспомогательной функции:

$$F_{\mu y}(\omega) = \frac{-\omega}{A_{\mu y}(\omega)} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} \cdot [M \cdot \sin(\varphi_{\mu y}(\omega)) + 1]$$

здесь  $A(\omega)$  – АЧХ объекта;  $\varphi(\omega)$  – ФЧХ объекта;  $M$  – частотный показатель колебательности.

Параметры настройки регулятора:

$$K_{n\_mu} = \frac{-M^2 \cdot \cos(\varphi_{\mu y}(\omega_{рез}))}{(M^2 - 1) \cdot A_{\mu y}(\omega_{рез})}$$

$$K_{u\_mu} = F_{\mu y}(\omega_{рез})$$

$$T_{u\_mu} = \frac{K_{n\_mu}}{K_{u\_mu}}$$

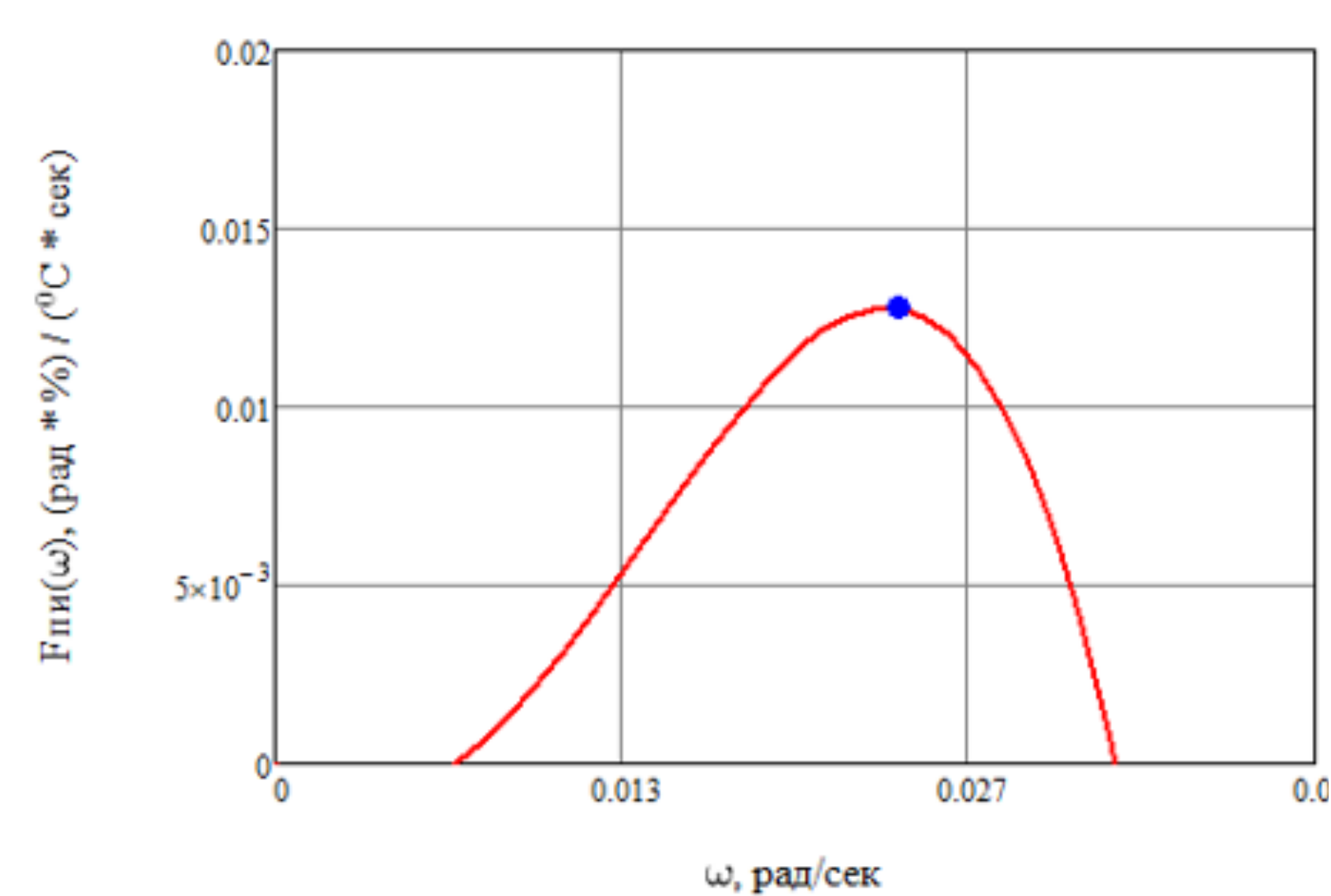


График вспомогательной функции

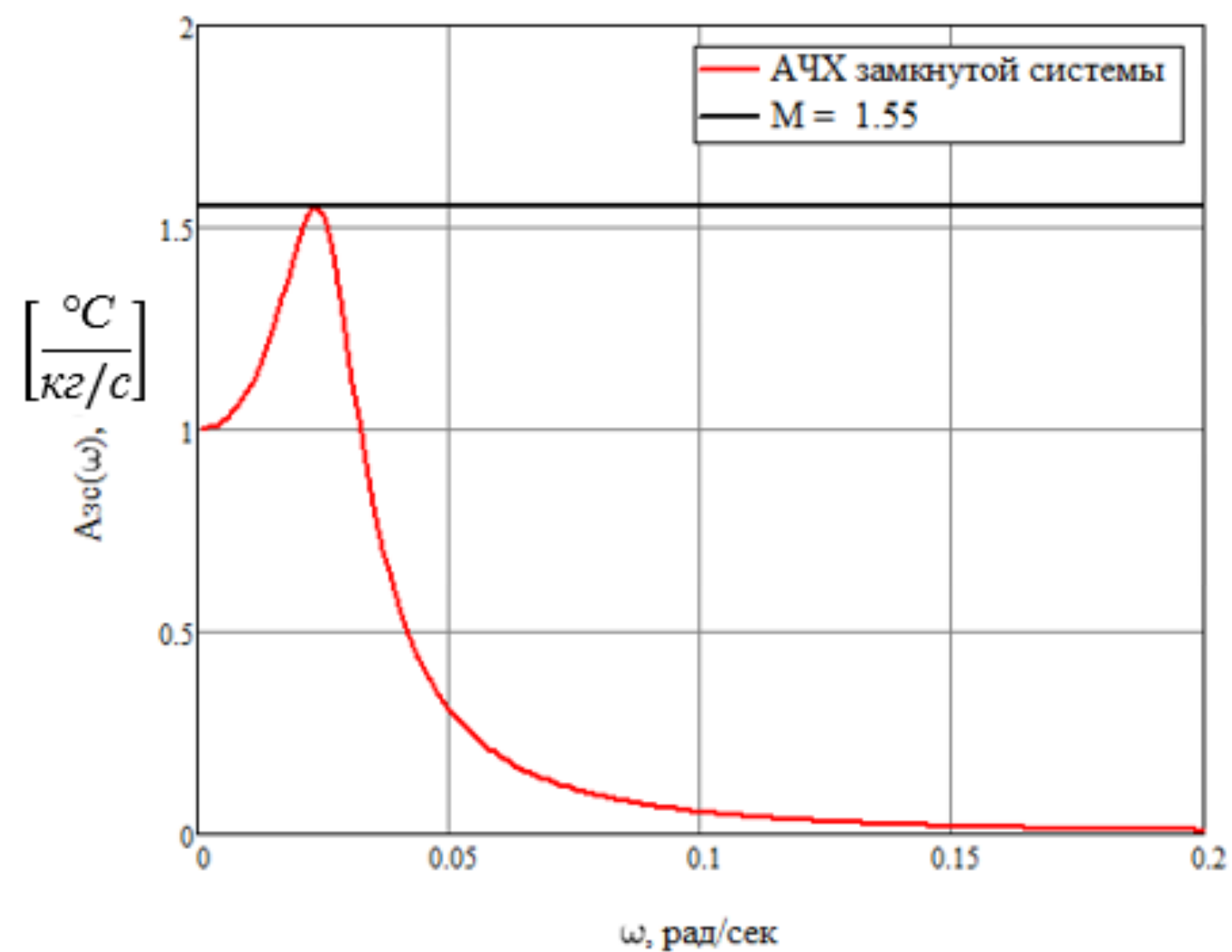
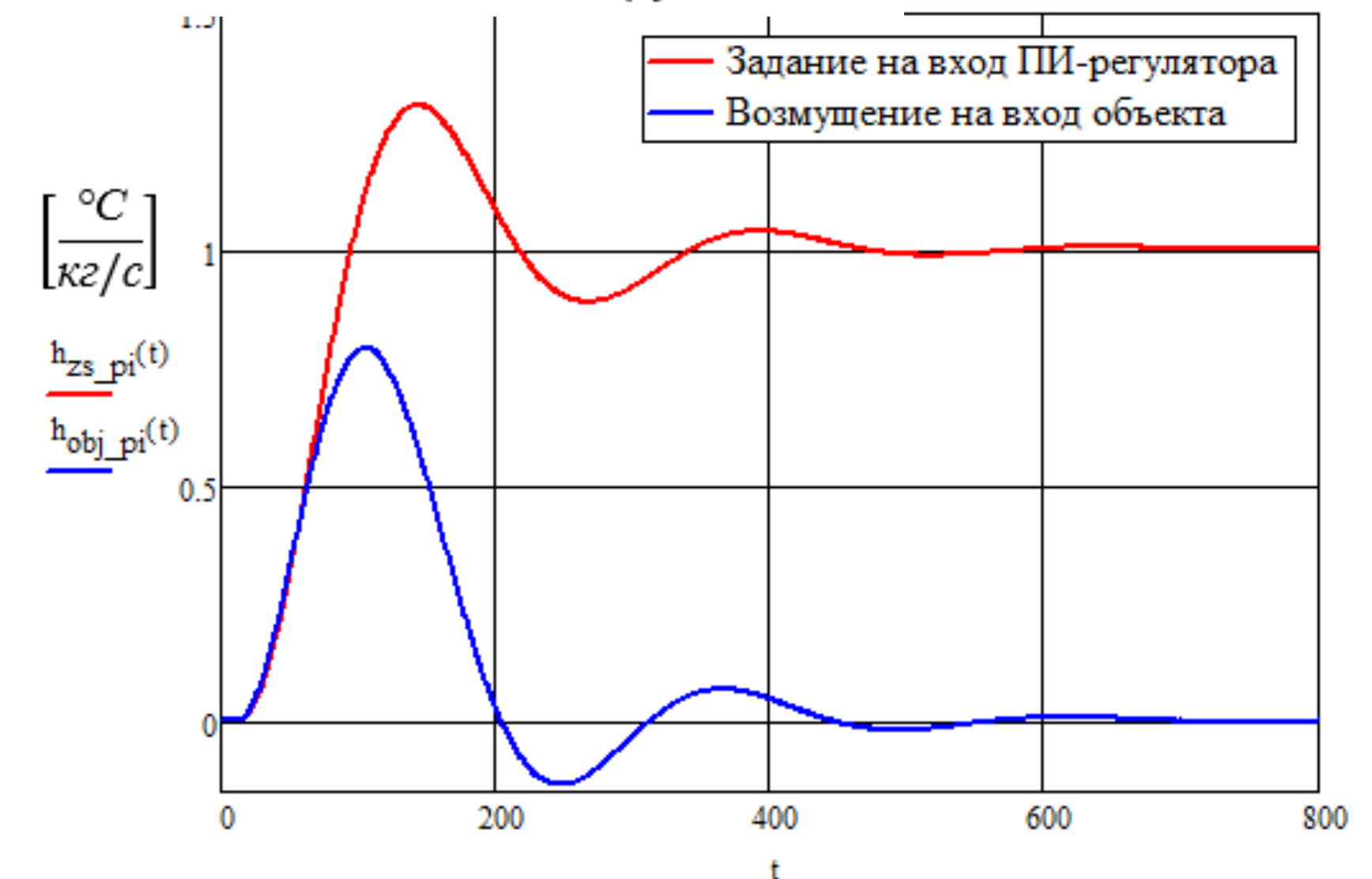


График АЧХ замкнутой одноконтурной АСР с ПИ-регулятором



Переходные характеристики замкнутой одноконтурной АСР с ПИ-регулятором.

# Полученные результаты

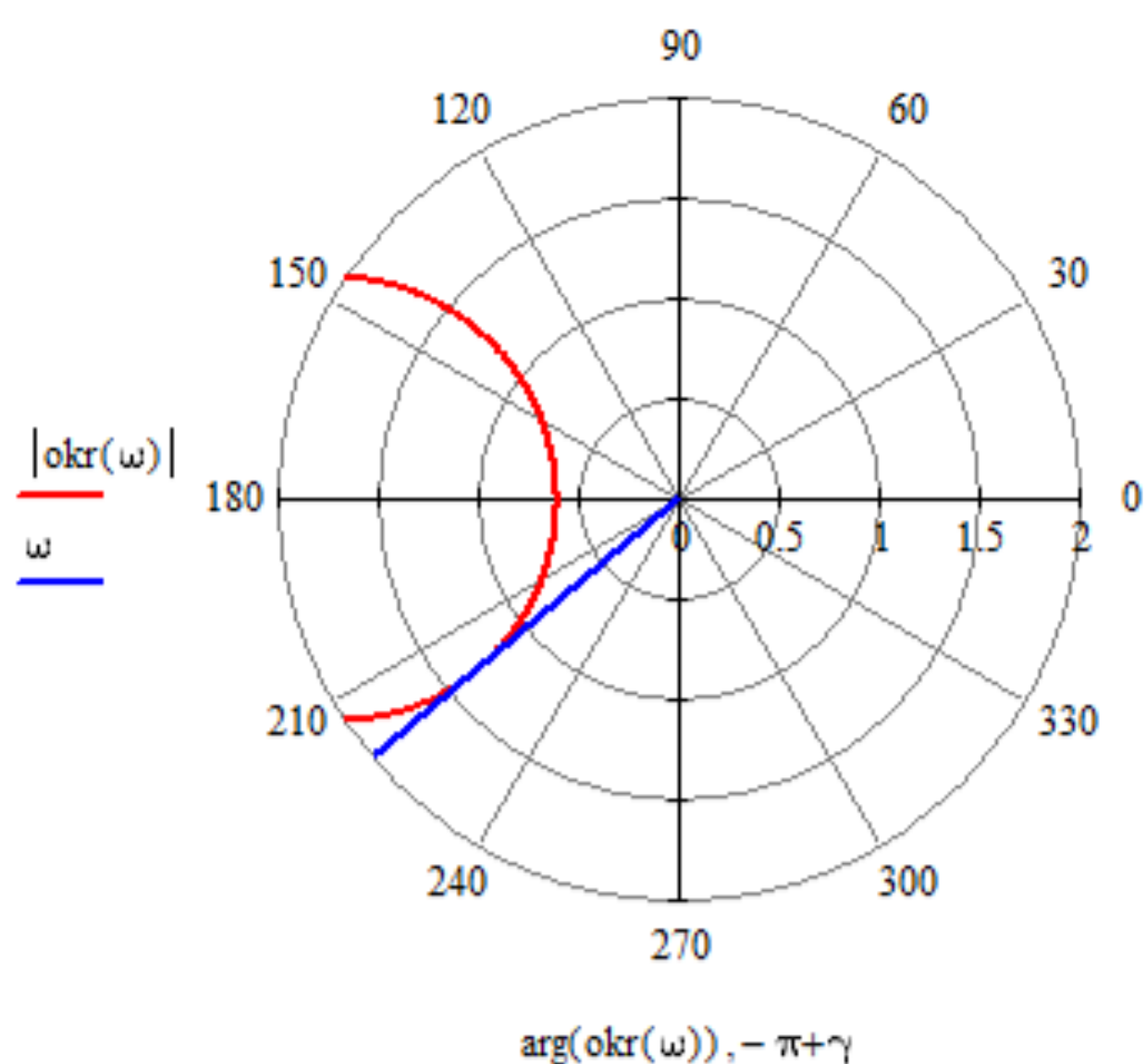
Одноконтурная АСР с ПИД-регулятором при ограничении на частотный показатель колебательности М

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right)$$

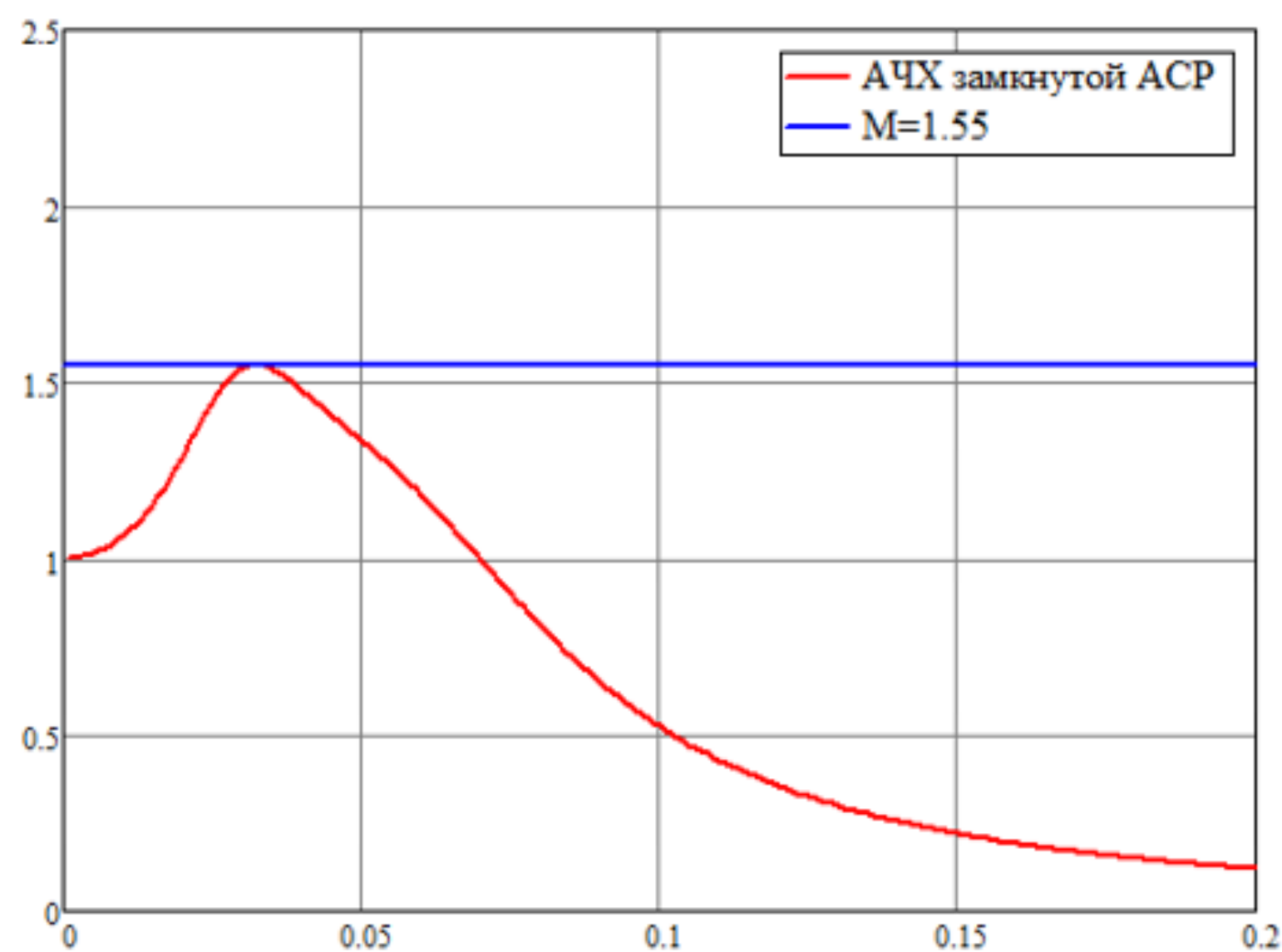
$$okr(\omega) = \frac{M}{M^2 - 1} \cdot e^{2 \cdot \pi \cdot (j \cdot \omega)} - \frac{M^2}{M^2 - 1}$$

Уравнение фаз:

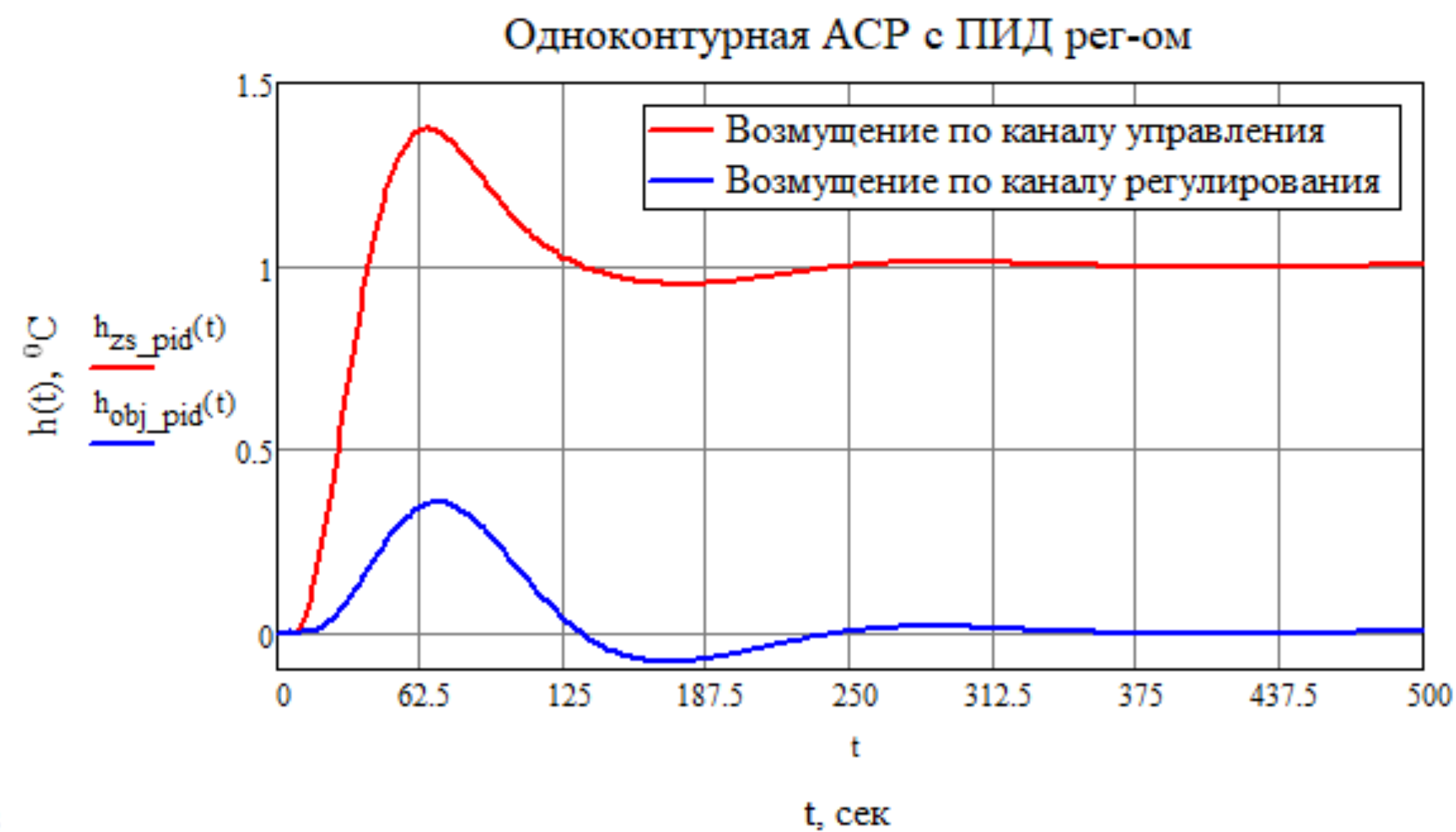
$$\varphi_{\mu y}(\omega) + \pi - \gamma = 0$$



Определение начальной частоты компенсации.



АЧХ замкнутой системы по каналу управления



Переходные характеристики замкнутой одноконтурной АСР с ПИД-регулятором

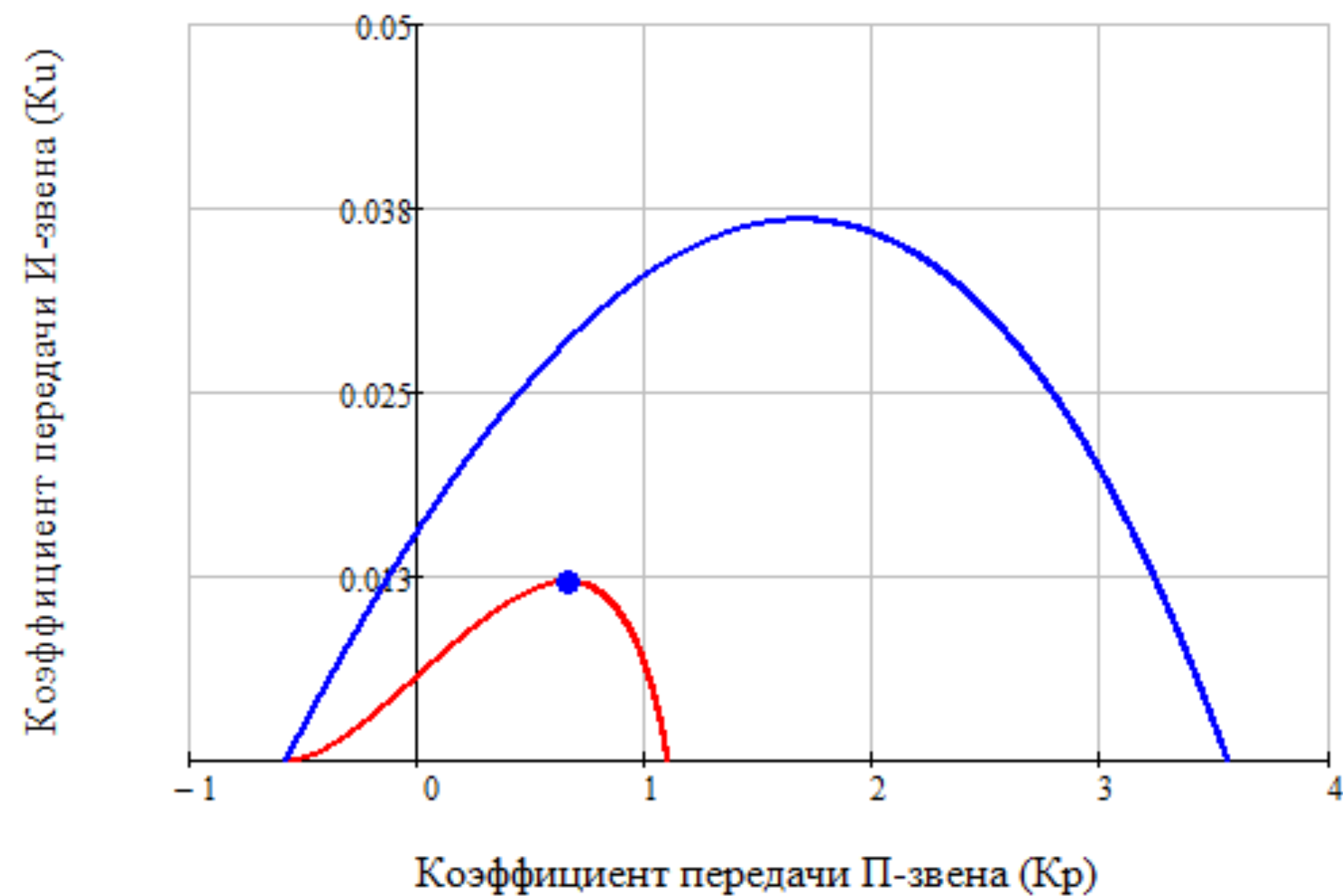
# Полученные результаты

Одноконтурная АСР с ПИ-регулятором при ограничении на корневой показатель колебательности  $m$

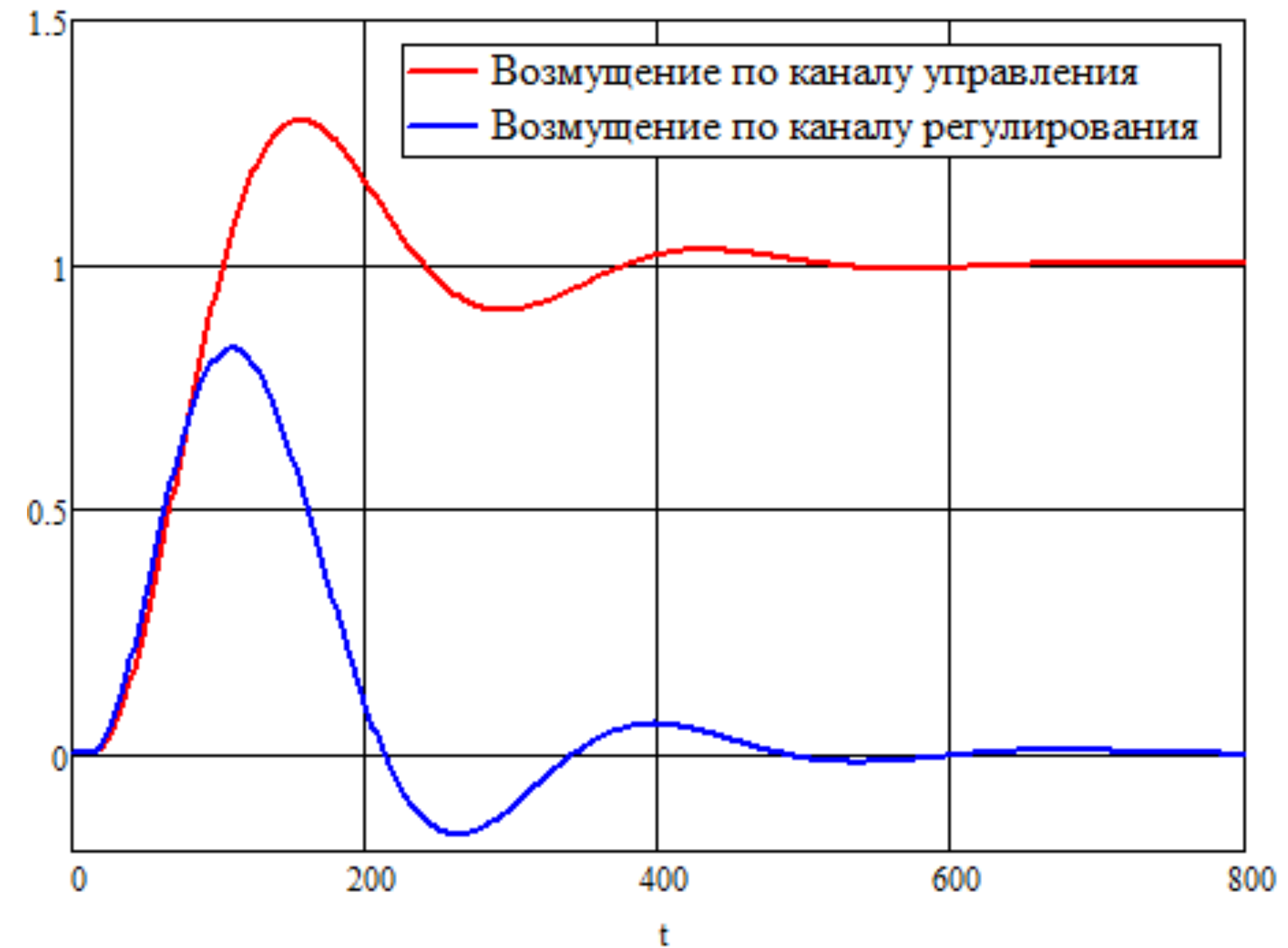
$$K_p(m, \omega) = -\frac{R_{\mu y}(m, \omega) + m \cdot I_{\mu y}(m, \omega)}{R_{\mu y}(m, \omega)^2 + I_{\mu y}(m, \omega)^2}$$

$$K_u(m, \omega) = -\frac{\omega \cdot (1 + m^2) \cdot I_{\mu y}(m, \omega)}{R_{\mu y}(m, \omega)^2 + I_{\mu y}(m, \omega)^2}$$

Плоскость параметров  $K_p$  и  $K_u$  для ПИ-регулятора



- Линия заданного запаса уст-ти  $m = 0.366$
- Линия границы уст-ти  $m = 0$
- • Параметры настройки



Переходные характеристики одноконтурной

АСР с ПИ-регулятором

# Полученные результаты

Одноконтурная АСР с ПИД-регулятором при ограничении на корневой показатель колебательности  $m$

$$T_i(m, \omega, \alpha) = \frac{-A_1(m, \omega) - \sqrt{A_1(m, \omega)^2 - 4 \cdot A_2(m, \omega, \alpha) \cdot A_0(m, \omega)}}{2 \cdot A_2(m, \omega, \alpha)}$$

$$K_i(m, \omega, \alpha) = \frac{1}{T_i(m, \omega, \alpha)^2 \cdot B_2(m, \omega, \alpha) - T_i(m, \omega, \alpha) \cdot B_1(m, \omega) + B_0(m, \omega)}$$

$$K_p(m, \omega, \alpha) = K_i(m, \omega, \alpha) \cdot T_i(m, \omega, \alpha)$$

$$A_0(m, \omega) = \frac{-1}{\omega \cdot (1 + m^2)} \cdot (R_{\mu y}(m, \omega) + m \cdot I_{\mu y}(m, \omega))$$

$$A_1(m, \omega) = Q(m, \omega)$$

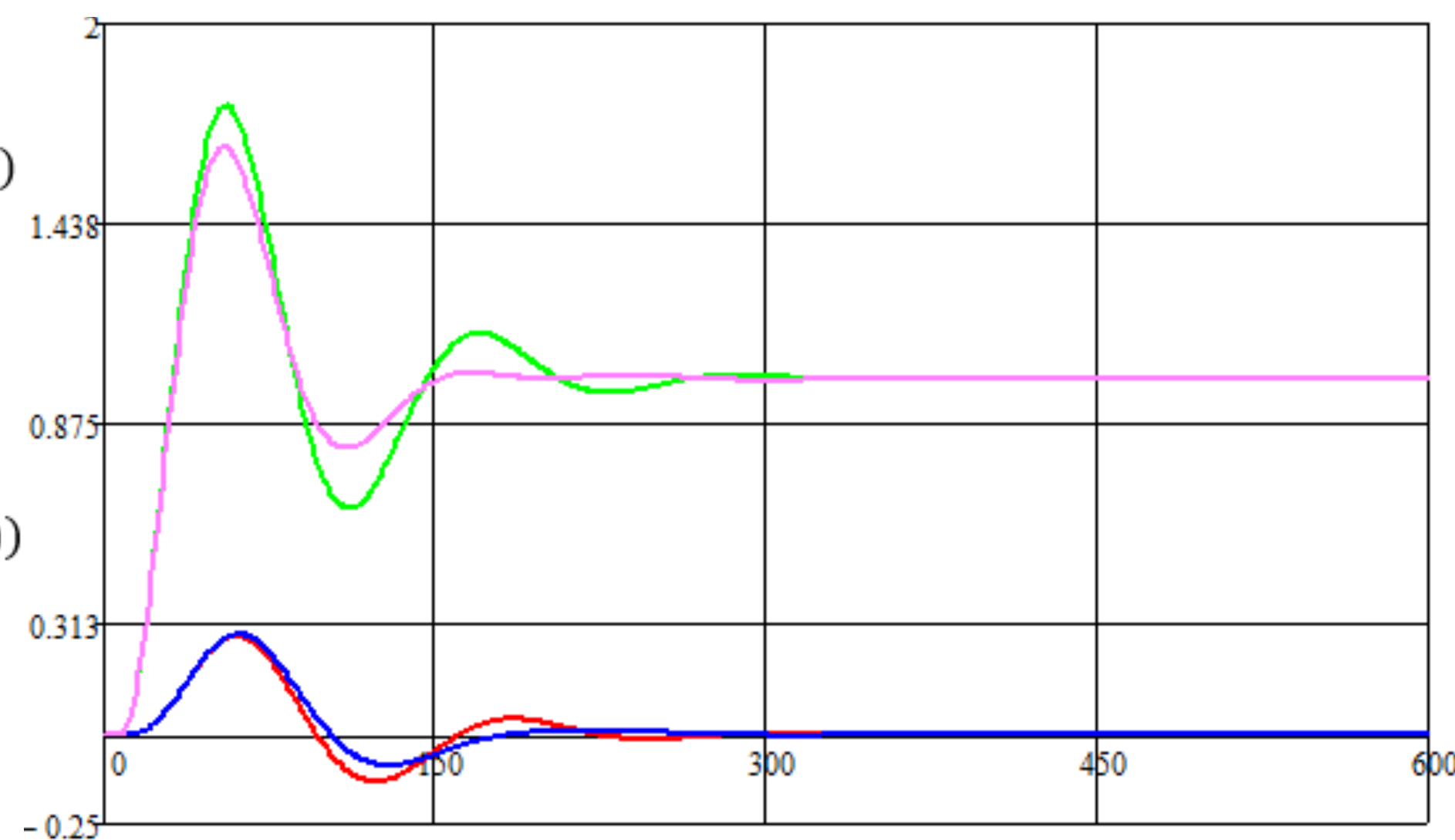
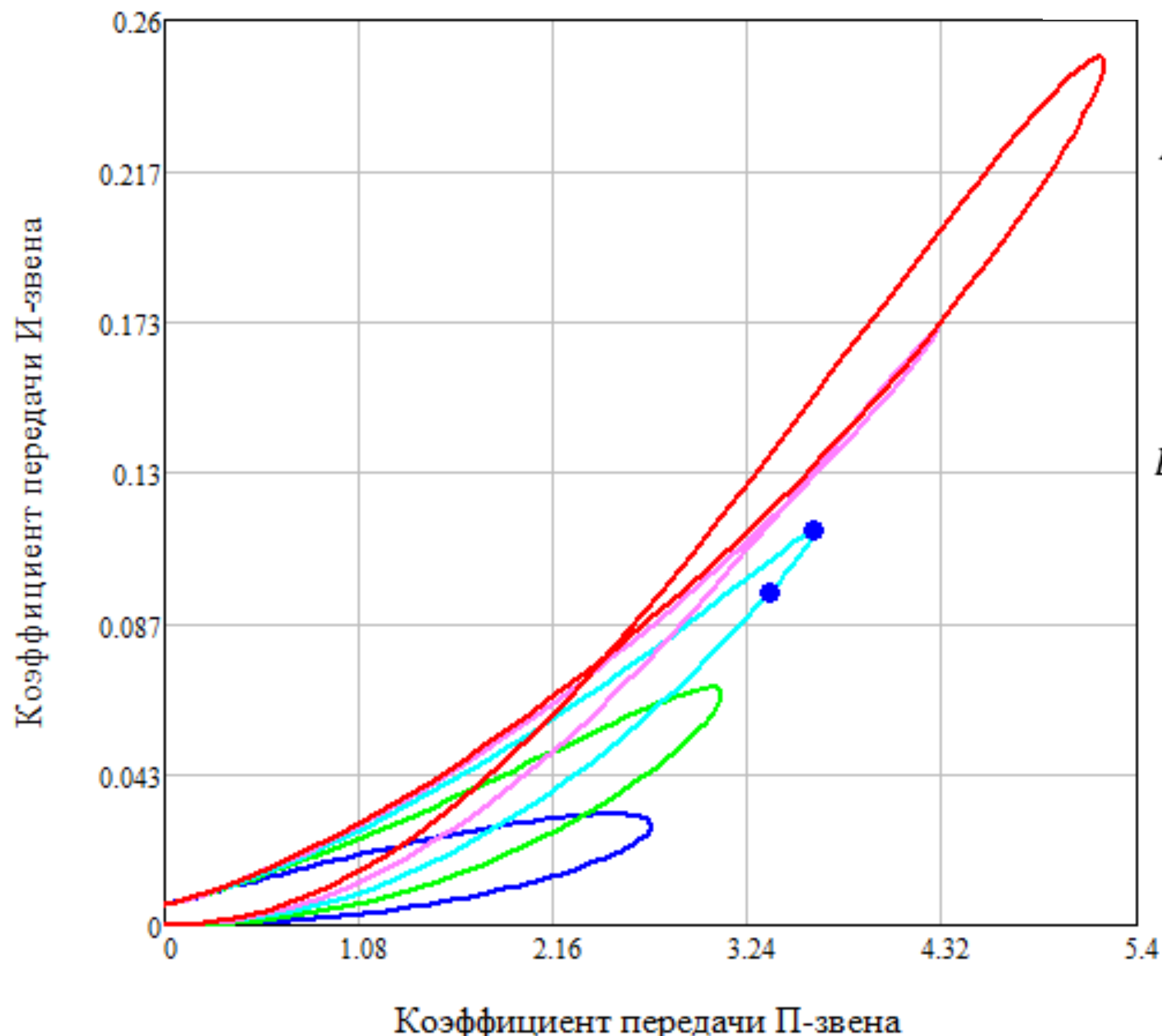
$$A_2(m, \omega, \alpha) = \alpha \cdot \omega \cdot (R_{\mu y}(m, \omega) - m \cdot I_{\mu y}(m, \omega))$$

$$B_0(m, \omega) = \frac{1}{\omega \cdot (1 + m^2)} \cdot (m \cdot R_{\mu y}(m, \omega) - I_{\mu y}(m, \omega))$$

$$B_1(m, \omega) = R_{\mu y}(m, \omega)$$

$$B_2(m, \omega, \alpha) = \alpha \cdot \omega \cdot (m \cdot R_{\mu y}(m, \omega) + I_{\mu y}(m, \omega))$$

Плоскость параметров ПИД-регулятора



- Возмущение по каналу регулирования при условии  $(K_i)_{\max}$
- Возмущение по каналу регулирования при робастных настройках
- Возмущение по каналу управления при условии  $(K_i)_{\max}$
- Возмущение по каналу управления при робастных настройках

# Полученные результаты

## Анализ данных переходных процессов

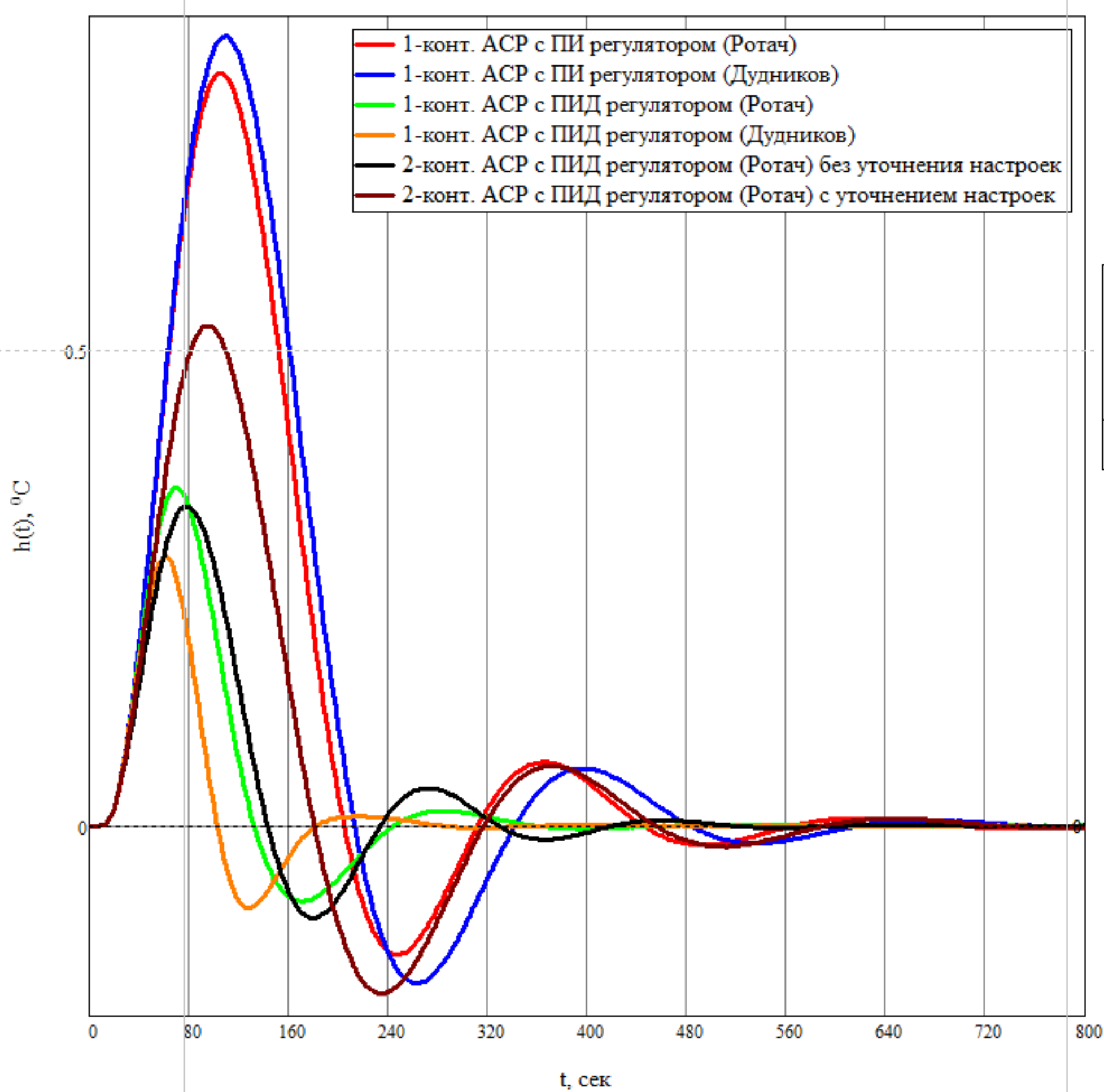


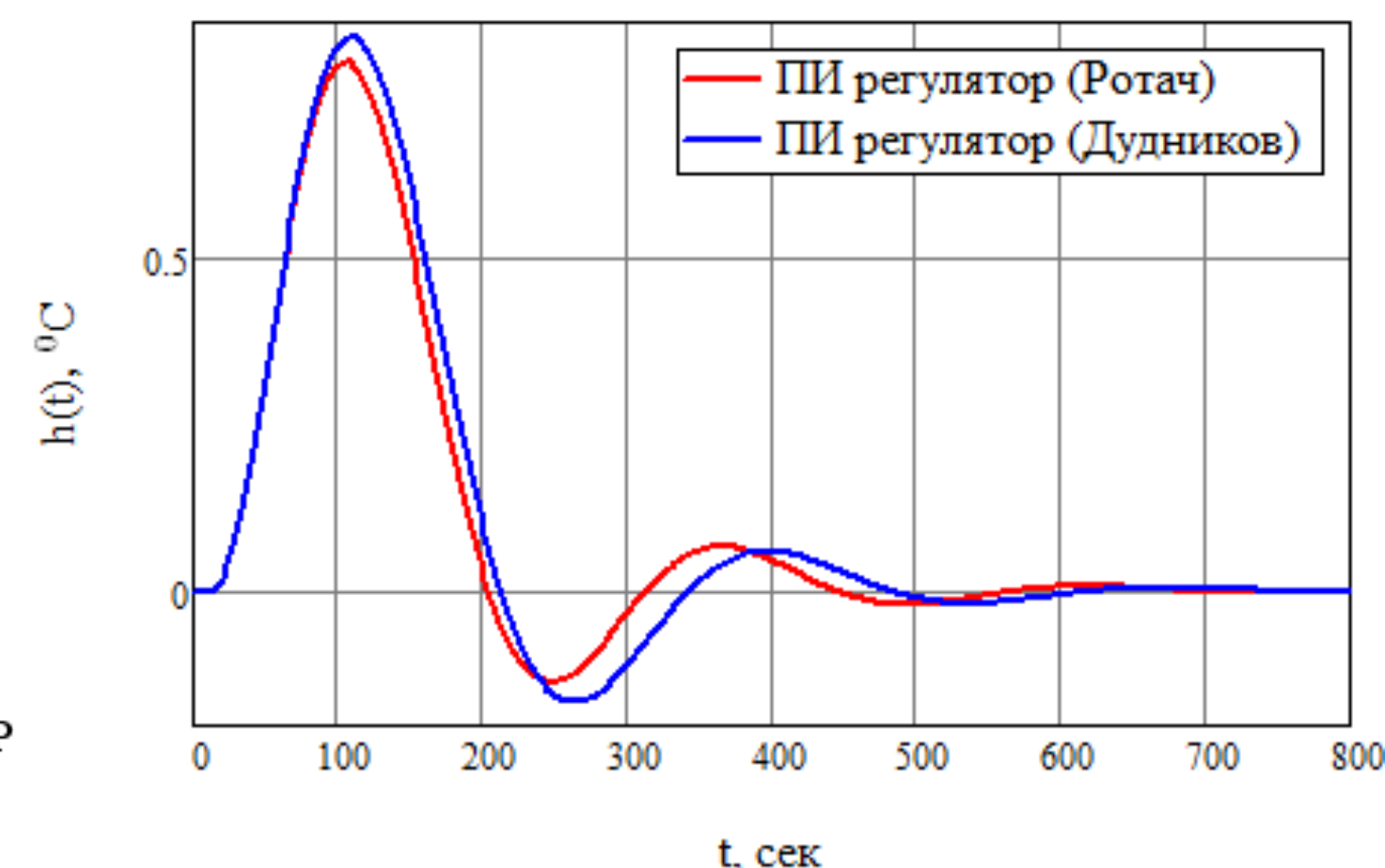
Таблица 1. Прямые показатели качества рассмотренных АСР

	1 контур с ПИ (М)	1 контур с ПИ (м)	1 контур с ПИД (М)	1 контур с ПИД (м)	2 контур с ПИД
Время регулирования (диапазон от +0.004°C до – 0.004°C) $t_{рег}$ , [сек]	406	436	228	168	174
Степень затухания $\psi$	0,916	0,927	0,956	0,966	0,963

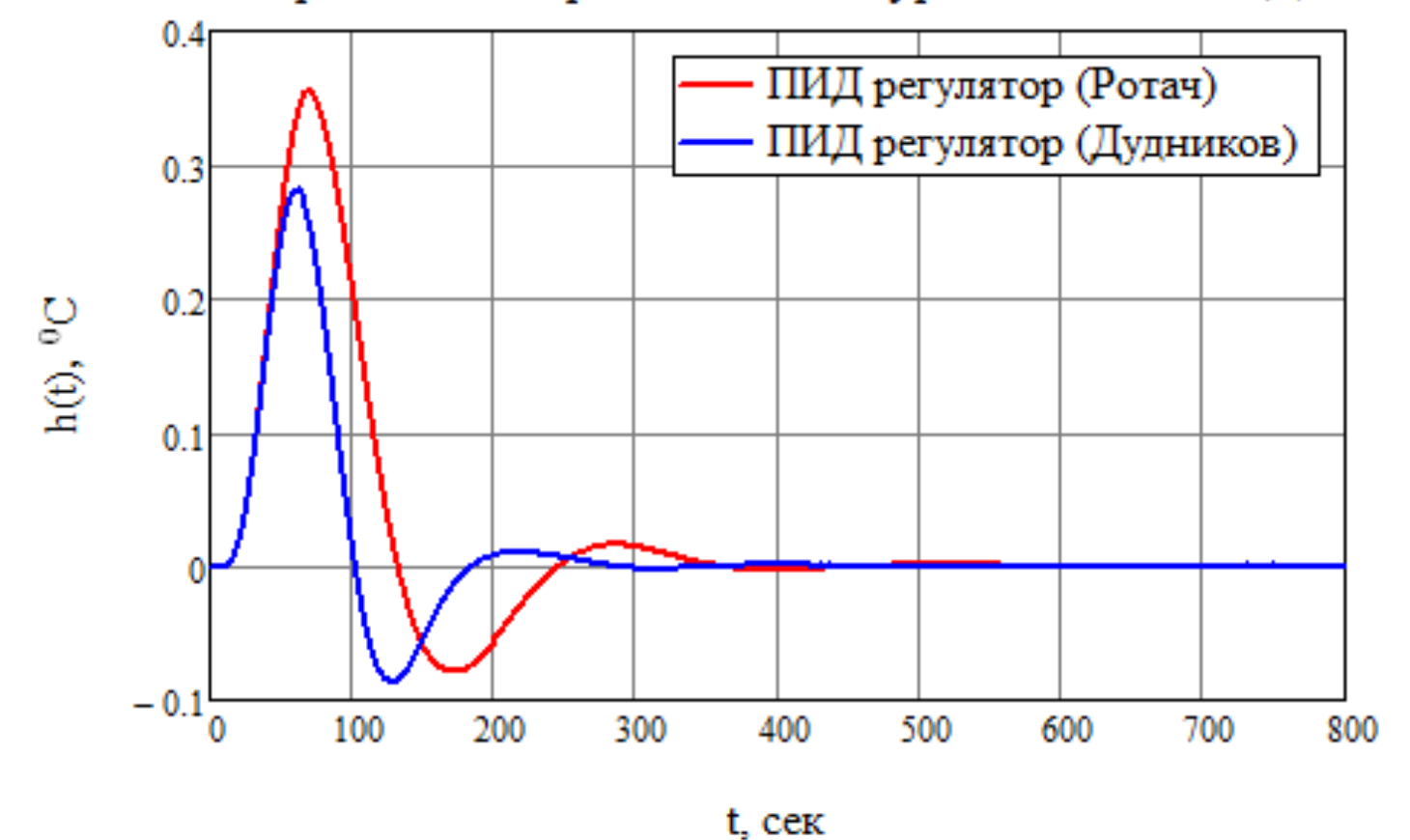
Таблица 2. Косвенные показатели качества рассмотренных АСР

	1 контур с ПИ (М)	1 контур с ПИ (м)	1 контур с ПИД (М)	1 контур с ПИД (м)	2 контур с ПИД
Линейный интегральный показатель $I_{лин}$ , [(°C · кг/с) · с]	78,152	82,443	18,431	10,489	2,567
Квадратичный интегральный показатель $I_{кв}$ , [(°C · кг/с) <sup>2</sup> · с]	50,996	59,547	6,454	3,208	0,147

Переходные хар-ки одноконтурной АСР с ПИ



Переходные хар-ки одноконтурной АСР с ПИД



# Публикации

## Этап 2021 – 2022

1. Куликов А.С., Пикина Г.А. Разработка моделей парогенератора блока БН-600 / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). М.: ИПУ РАН, 2021. С. 545-555;
2. G.A. Pikina, A.F. Pashchenko, A.S. Kulikov. Developing a Method for Determining the Dynamic Characteristics of Heat Exchangers with Cross-Flowing Stream / IFAC-PapersOnline. (принято к публикации CPES 2022). (Web Of Science)

# Цели на второй год

Этап 2022 – 2023

1. Анализ методов настройки двухконтурных систем автоматического регулирования;
2. Математическое моделирование теплового оборудования энергоблоков типа БН-600;
3. Разработка и использование гибридных регуляторов в системах принятия решений.

**Спасибо за внимание!**