



- [4] Очеретяный Ю.А. Определение изменений теплотехнических характеристик судовых холодильных установок в процессе эксплуатации // Холодильная техника и технология. – 2013. – Вып. 2 (142). – С. 15-19.
- [5] Очеретяный Ю.А. Определение отклонений функционирования судовой холодильной установки в процессе эксплуатации // Холодильная техника и технология. – 2013. – Вып. 3 (143). – С. 10-14.
- [6] Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.Й., Тюхай Д.С. Разработка системы измерения энергетических показателей компрессионной холодильной установки // Харчова наука і технологія. – 2011. – Вып. 4(17). – С. 107 - 109.
- [7] Очеретяный Ю.А. Определение термодинамических показателей судовой холодильной установки в процессе эксплуатации // Проблеми техніки. - 2013. – Вып. 2. – С. 119 - 125.

#### References

- [1] Zagoruiko V. A., Golikov A. A. Ship refrigeration equipment. Kiev: Naukova Dumka, 2000. 607p.
- [2] Ocheretyanyu Y. Technical operation of ship refrigeration units and air conditioning systems. Textbook for cadets and students of higher marine educational institutions, 2014. Odessa: ONMA Publishing House, 204 p.
- [3] Ocheretyany Y. A., Zhivitsa V. I., Belyi V. N., Onishchenko O. A., Weinfeld E. Y. The concept of a system for computer monitoring and technical diagnostics of a refrigerator installation of a ship. Ship power plants, 2011. Issue. 28. Pp. 5-11.
- [4] Ocheretyanyu Y. Determination of changes in the thermal characteristics of ship refrigeration units during operation. Refrigeration Engineering and technology. 2013. No. 2(142). Pp. 15-19.
- [5] Ocheretyanyu Y. Determination of deviations of functioning of a ship refrigeration unit during operation. Refrigeration Engineering and technology. 2013. No. 3(143). Pp. 10-14.
- [6] Ocheretyanyu Y. A., Zhivitsa V. I., Onishchenko O. A., Weinfeld E. I., Tyukhai D. S. Development of a system for measuring the energy performance of a compression refrigeration unit. Food science and technology. 2011. No. 4(17). Pp. 107-109.
- [7] Ocheretyany Y. Determination of thermodynamic indicators of a ship refrigeration unit during operation. Problems of technology. 2013. No. 2. Pp. 119-125.

УДК [621.867.3:622.612]:658.5

## САР ИНВАРИАНТНАЯ К КОНТРОЛИРУЕМЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ СИГНАЛА КОРРЕКЦИИ ПО КУБИЧЕСКОМУ СПЛАЙНУ

М. Т. Степанов<sup>1</sup>, В. А. Хобин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна  
ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1297-5537>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0238-8371>  
e-mail: <sup>1</sup> [stepanov197818@gmail.com](mailto:stepanov197818@gmail.com); <sup>2</sup> [khobin@onaft.edu.ua](mailto:khobin@onaft.edu.ua)

Copyright © 2020 by author and the journal “Automation of technological and business - processes.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1705>

**Аннотация.** В статье рассматривается система автоматического регулирования, реализующая комбинированный принцип управления инвариантная относительно контролируемых возмущений. В математических моделях корректирующих связей систем автоматического регулирования инвариантных к контролируемым возмущениям часто присутствуют физически не реализуемые звенья чистого опережения. В инженерной практике для прогнозирования сигнала коррекции на время вперед такие звенья приближенно заменяют форсирующими звеньями. В качестве альтернативы такому подходу предлагается вести прогнозирование сигнала коррекции на основе кубического сплайна. Проведенный анализ показывает, что отдельные участки траектории движения сигнала могут быть представлены непрерывными, многократно дифференцируемыми функциями (например, кубическим сплайном).



Для модели кубического сплайнов найдены соотношения, позволяющие оценивать их параметры и вести расчет прогнозного значения переменной в реальном времени. Проведен структурный и оптимальный параметрический синтез альтернативных вариантов систем автоматического регулирования инвариантных к контролируемым возмущениям. Сравнительный анализ оптимальных систем, проведенный во временной и частотных областях показал значительное преимущество системы регулирования с прогнозированием сигнала коррекции по кубическому сплайну. В сравнении с системой, где для прогнозирования используется форсирующее звено, система регулирования с прогнозированием по кубическому сплайну обеспечивает снижение интегрального и прямых показателей качества в несколько раз. Анализ амплитудо-частотных характеристик систем автоматического регулирования показал, что система автоматического регулирования с прогнозированием сигнала коррекции по кубическому сплайну может эффективно подавлять возмущения в широком диапазоне частот.

**Abstract.** The article provides an automatic control system that offers a combined control principle that is invariant with respect to controlled disturbances. In mathematical models of corrective connections of automatic control systems that are invariant to controlled disturbances, physically unrealizable links of pure lead are often present. In engineering practice, to predict the correction signal for the time ahead, such links are approximately replaced by boosters. As an alternative to this approach, it is proposed to predict the correction signal based on the cubic spline. The analysis shows that individual sections of the path of the correction signal can be represented by continuous, repeatedly differentiable functions (for example, a cubic spline). Relationships have been found for the cubic splines model, which make it possible to evaluate their parameters and calculate the predicted value of the variable in real time. The structural and optimal parametric synthesis of alternative variants of automatic control systems invariant to controlled disturbances is carried out. A comparative analysis of the optimal systems carried out in the time and frequency domains showed a significant advantage of the control system with the prediction of the correction signal for the cubic spline. In comparison with a system where a boosting link is used for forecasting, a regulation system with cubic spline forecasting provides a several-fold decrease in the integral and direct quality indicators. Analysis of the amplitude-frequency characteristics of automatic control systems showed that the automatic control system with the prediction of the correction signal for the cubic spline can effectively suppress disturbances in a wide frequency range.

**Ключевые слова:** прогнозирование, кубический сплайн, ошибка прогнозирования, система автоматического регулирования, инвариантность.

**Keywords:** prediction, cubic spline, prediction error, automatic control system, invariance.

## Введение

Построение САР инвариантных к контролируемым возмущениям на основе принципа Б.Н. Петрова позволяет в значительной мере компенсировать эти возмущения и снизить ошибки стабилизации. При синтезе САР инвариантных к контролируемым возмущениям в математических моделях корректирующих связей часто присутствуют физически не реализуемые звенья чистого опережения. Появление звена чистого опережения происходит, когда в объекте управления (ОУ) запаздывание в канале управления значительно больше, чем запаздывание в канале действия контролируемых возмущений и пренебречь этой составляющей невозможно. В инженерной практике при реализации корректирующей связи для прогнозирования сигнала коррекции на время вперед такие звенья приближенно заменяют реальными форсирующими звеньями. В качестве альтернативы такому подходу предлагается вести более точное прогнозирование сигнала коррекции на основе кубического сплайна, что позволит эффективнее компенсировать контролируемые возмущения.

## Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проведенный в [1] анализ показывает, что отдельные участки траектории движения регулируемой переменной могут быть представлены непрерывными, многократно дифференцируемыми функциями (сплайнами). В качестве наиболее эффективного рассматривается кубический сплайн. Для моделей кубического сплайна найдены соотношения, позволяющие оценивать их параметры в реальном времени и вести расчет прогнозного значения переменной. Результаты исследований показали, что использование кубического сплайна позволяет достаточно точно прогнозировать значения гармонических сигналов на интервалах меньших полупериода, а случайных гауссовских процессов на интервалах меньших одного, двух интервалов корреляции, при этом большие интервалы прогнозирования соответствуют узкополосным, близким к квазигармоническим случайным процессам. Полученные результаты подтверждают возможность включить выбранный сплайн для прогнозирования отфильтрованных от шумов координатных возмущений без больших погрешностей на время соизмеримое с временем запаздывания в канале управления. Но это требует дополнительных исследований разработанных алгоритмов в цепях САР.

Анализ современных подходов [2,3] подтверждает актуальность использования принципа управления по прогнозу в современных САР в том числе в системах с комбинированным принципом управления.

## Цель и задачи исследования

Целью исследования является оценка повышения динамической точности САР инвариантной к контролируемым возмущениям за счет прогнозирования сигнала коррекции по кубическому сплайну для случая, когда в математической модели корректирующей связи присутствует физически не реализуемые звенья чистого опережения.



Для этого звена чистого опережения заменяем математической моделью прогнозирования на основе кубического сплайна. Для достижения поставленной цели необходимо провести структурный и оптимальный параметрический синтез САР инвариантных к контролируемым возмущениям с прогнозированием сигнала коррекции на основе реального форсирующего звена и на основе кубического сплайна. После этого провести всесторонний сравнительный анализ этих систем.

### Методы и материалы исследований

Для проведения исследований в качестве основного метода будем использовать метод имитационного моделирования в среде Simulink системы Matlab. Для этого на первом этапе разработаем структурные схемы САР и проведем расчет корректирующих связей. Структурная схема САР инвариантной к контролируемым возмущениям представлена на рисунке 1.

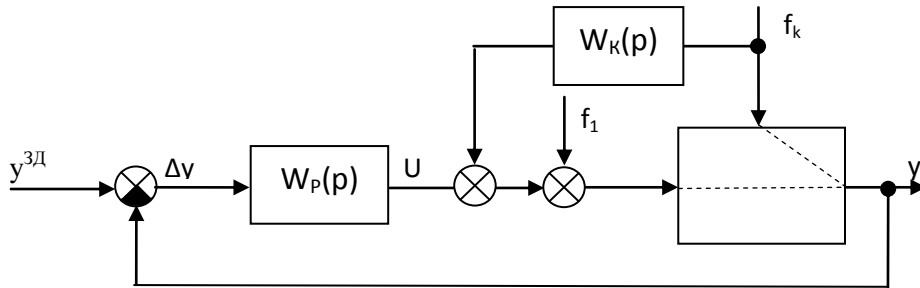


Рис. 1 – Структурная схема комбинированной САР инвариантной к контролируемым возмущениям

В качестве регулятора будем использовать ПИД - регулятор с реальным дифференциатором. Для оценки качества работы САР в установившихся режимах воспользуемся интегральным квадратичным показателем качества:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta y(t))^2 dt \quad (1)$$

Модель объекта управления рассмотрим со статическими свойствами и значительно разными запаздываниями по каналам управления и возмущения. На рисунке 2 представлены нормированные переходные характеристики модели ОУ по каналу управления и каналу контролируемого возмущения с иллюстрацией процедуры параметрической идентификации моделей первого порядка по методике Милиной.

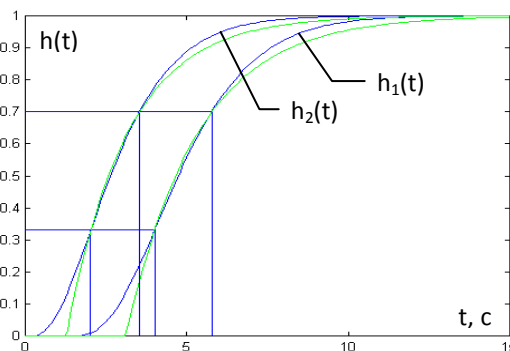


Рис. 2 – Иллюстрация процедуры параметрической идентификации параметров модели ОУ (методика Милиной) по каналам управления (h1) и по каналу действия контролируемого возмущения (h2).

Передаточные функции моделей первого порядка по каналу управления и по каналу контролируемых возмущений.

$$W_{uy}(p) = \frac{1.2e^{-3.1p}}{2.2p+1} \quad W_{ky}(p) = \frac{e^{-1.3p}}{1.9p+1} \quad (2)$$

Передаточная функция корректирующей связи будет иметь следующий вид:

$$W^k(p) = -\frac{e^{-1.3p}}{\frac{1.9p+1}{1.2e^{-3.1p}}} = \frac{1}{1.2} * \frac{2.2p+1}{1.9p+1} * e^{+1.8p} \quad (3)$$



Звено чистого опережения приблизительно заменим реальным форсирующим звеном. Тогда физически реализуемая передаточная функция корректирующей связи примет следующий вид.

$$W^k(p) = -\frac{1}{1.2} * \frac{2.2p+1}{1.9p+1} * \left(1 + \frac{1.8p}{0.1*1.8p+1}\right) \quad (4)$$

Заменим в (4) реальное форсирующее звено на алгоритм прогнозирования по кубическому сплайну и выделим его в отдельный модуль прогнозирования (МП). Структурная схема САР примет следующий вид (рис. 3).

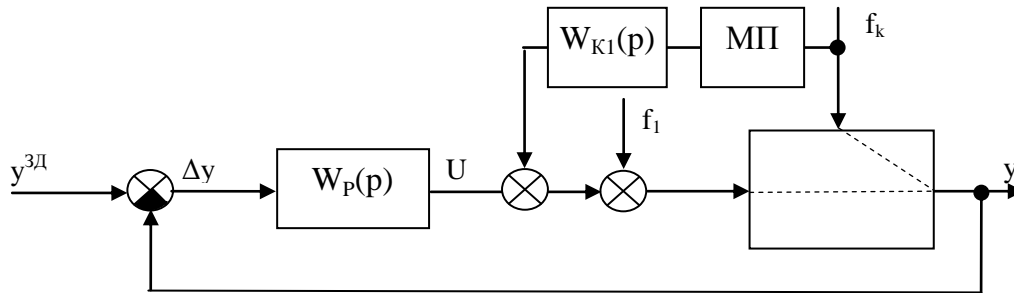


Рис. 3 – Структурная схема комбинированной САР инвариантной к контролируемым возмущениям с модулем прогнозирования по кубическому сплайну.

Модуль прогнозирования по кубическому сплайну будем реализовывать на основе следующего выражения:

$$f_k(t + \Delta\tau_{пр}) = \bar{f}_k(t) + d(t)(t + \Delta\tau_{пр})^3 + c(t)(t + \Delta\tau_{пр})^2 + b(t)(t + \Delta\tau_{пр}) + a(t) \quad (5)$$

$\Delta\tau_{пр} \in [0, \tau_{пр}]$ .

Тогда, если могут быть найдены значения трех производных этих оценок в момент времени  $t = t_0$ , то оценки значений коэффициентов в (5) определяются из простых и удобных для расчета в реальном времени соотношений:

$$\begin{aligned} d(t_0) &= \ddot{f}_k(t_0)/6, \\ c(t_0) &= (\dot{f}_k(t_0) - \ddot{f}_k(t_0)t_0)/2, \\ b(t_0) &= \dot{f}_k(t_0) - \ddot{f}_k(t_0)t_0 + \ddot{f}_k(t_0)t_0^2/2, \\ a(t_0) + \bar{f}_k(t_0) &= f_k(t_0) - \dot{f}_k(t_0)t_0 + \ddot{f}_k(t_0)t_0^2/2 - \ddot{f}_k(t_0)t_0^3/6, \end{aligned} \quad (6)$$

а спрогнозированные на  $\tau_{пр}$  вперед значения необходимых оценок рассчитываются из выражений:

$$f_k(t_0 + \tau_{пр}) = d(t_0)(t_0 + \tau_{пр})^3 + c(t_0)(t_0 + \tau_{пр})^2 + b(t_0)(t_0 + \tau_{пр}) + a(t_0) + \bar{y}(t_0).$$

Необходимым условием работы алгоритма, является трехкратная дифференцируемость  $f_k(t)$ . Это условие вполне выполнимо, т. к. переменные на входе ОУ, отфильтрованные от шумов, как правило, являются многократно дифференцируемыми.

В рассмотренном сплайне расчет коэффициентов ведется в предположении, что в момент  $t_0$  известны значения самой переменной и всех необходимых производных. В случае цифровой реализации алгоритма управления, а именно она предполагается как основная, производные вычисляются по значениям решетчатой функции  $f_k(nT_{кв})$ ,  $n = \overline{0, \infty}$ , с шагом квантования  $T_{кв}$ .

Для проведения сравнительного анализа работы САР с разными реализациями корректирующих связей введем следующие обозначения: САРИ - САР инвариантная к контролируемым возмущениям с реальным форсирующим звеном; САРИК - САР инвариантная к контролируемым возмущениям с прогнозированием по кубическому сплайну.

Проведем исследование работы инвариантной САР с разными корректирующими связями в условиях действия возмущений случайного характера. Но вначале проведем оптимальный параметрический синтез (ОПС) САР без корректирующей связи. Результаты ОПС представлены на рисунке 4.

Реализация случайного процесса контролируемых возмущений, а также его статические и динамические характеристики представлены на рисунке 5.

Для проведения исследований и анализа работы различных вариантов САР была разработана схема моделирования в среде Simulink. Фрагмент схемы моделирования представлен на рисунке 6.

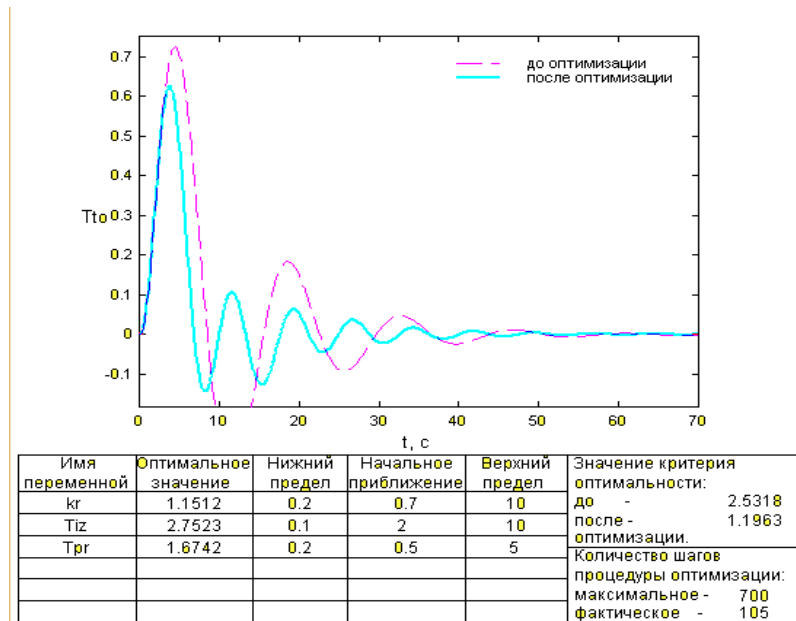


Рис. 4 – Результаты оптимального параметрического синтеза ПИД регулятора

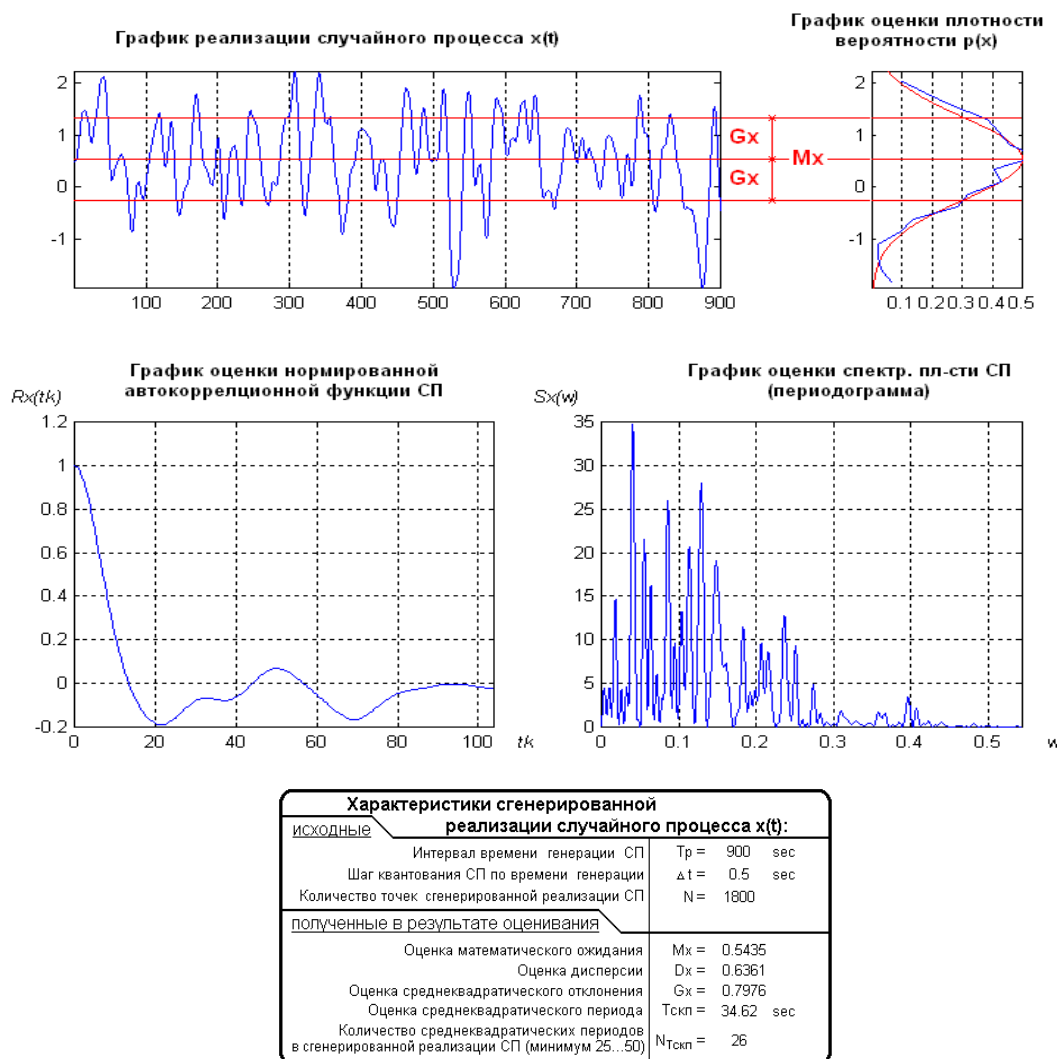


Рис. 5 – Реализация контролируемых возмущений и их вероятностные характеристики

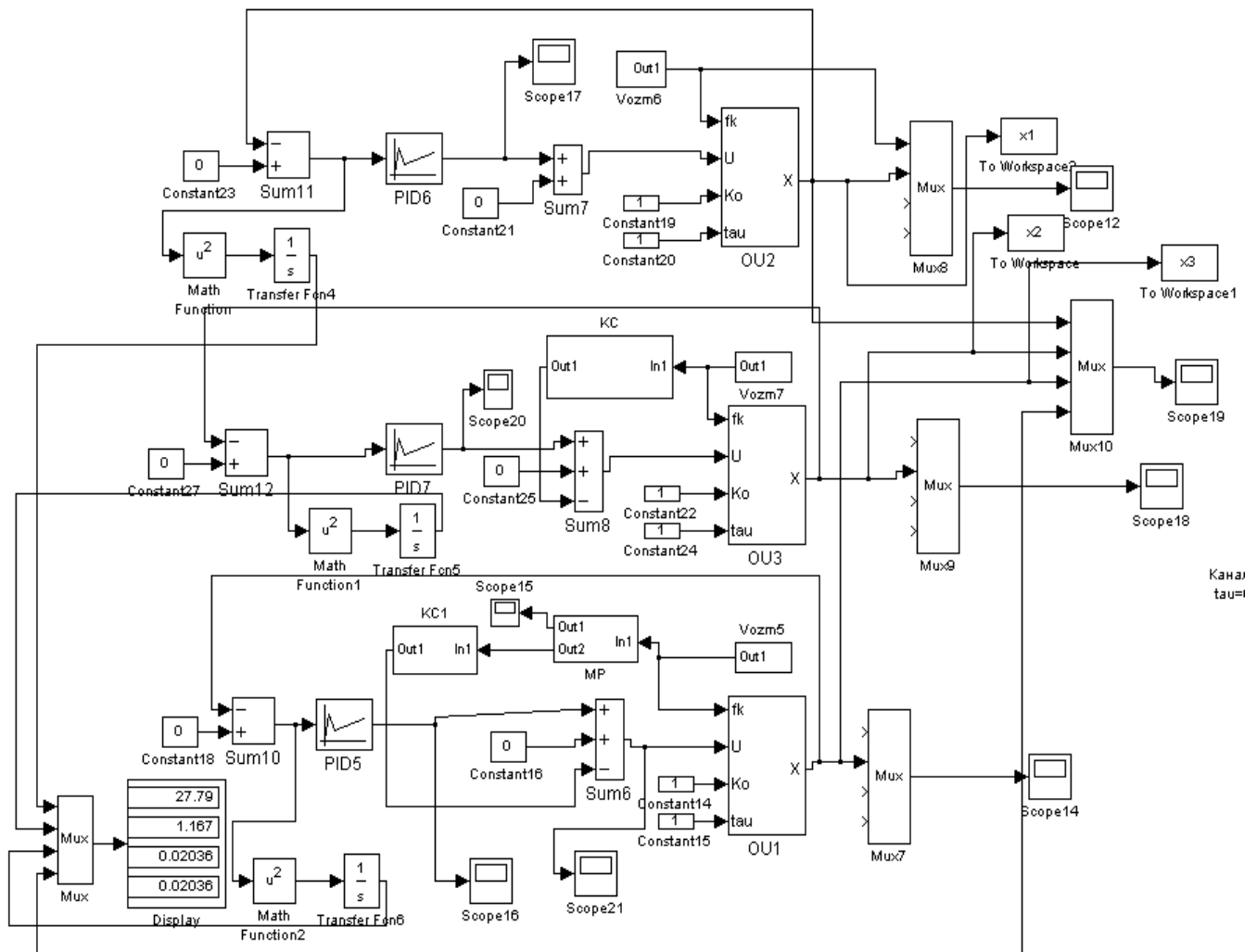


Рис. 6 – Фрагмент схемы моделирования для проведения сравнительного анализа работы альтернативных вариантов САР

### Результаты исследований и их обсуждение

Для получения предварительных результатов проведены исследования систем без оптимизации параметров корректирующей связи. На рисунке 7 представлены результаты моделирования обычной САР реализующей принцип управления по отклонению и САРИ инвариантной к контролируемым возмущениям. Введение корректирующей связи значительно снижает ошибки стабилизации.

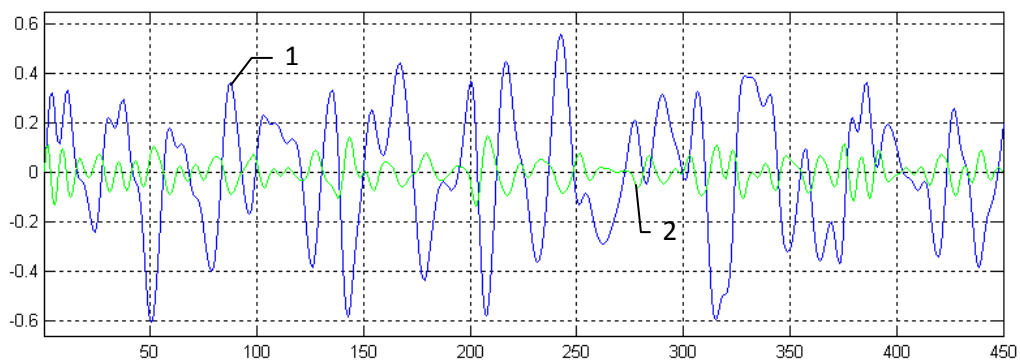
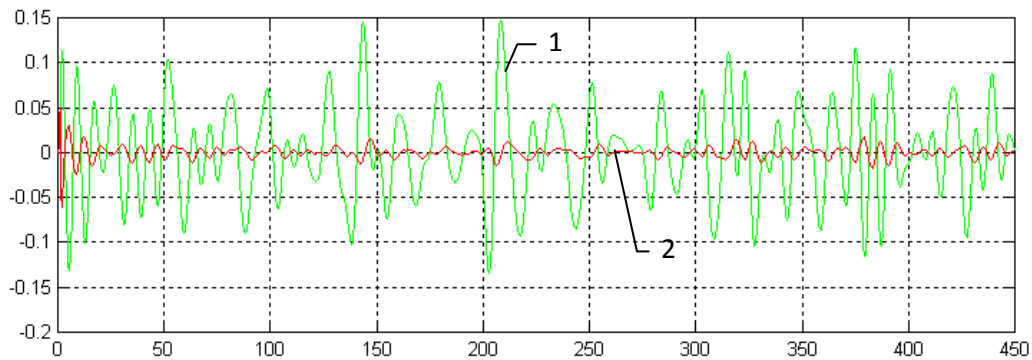


Рис. 7 – Результаты моделирования базовой САР (1) и инвариантной САР без прогнозирования по кубическому сплайну (2)

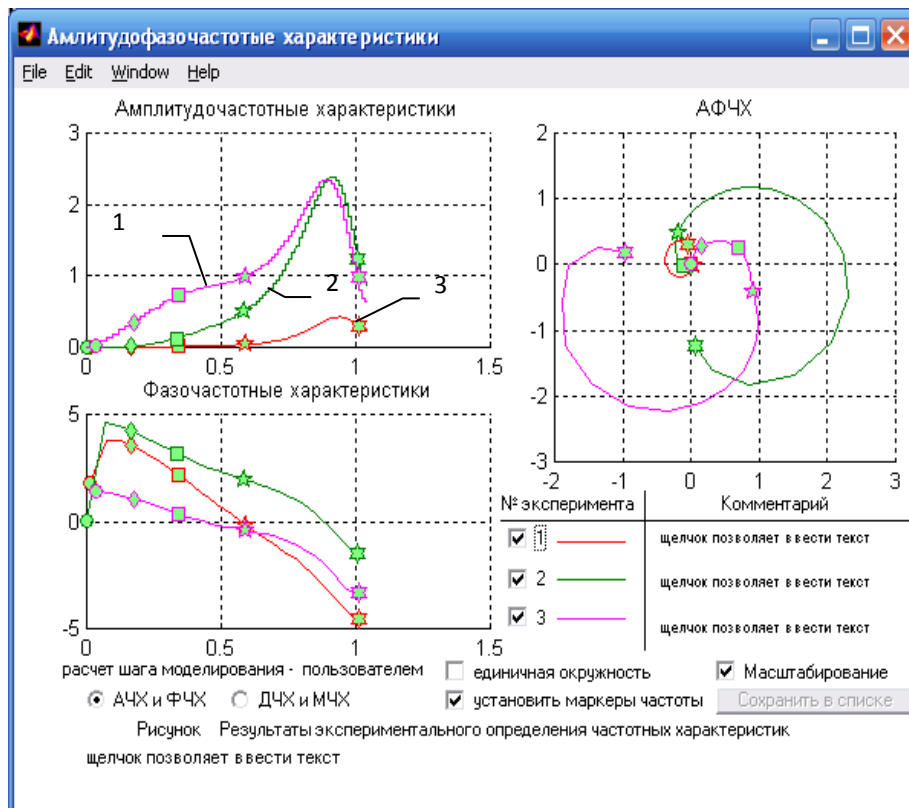


На рисунке 8 представлены результаты моделирования САРИ и САРИК. Из рисунка видно, что введение в корректирующую связь модуля прогнозирования по кубическому сплайну значительно улучшило работу инвариантной САР.



**Рис. 8 – Результаты моделирования инвариантной САР (1) и инвариантной САР с прогнозированием по кубическому сплайну (2).**

Преимущества САРИК подтверждаются и при анализе работы альтернативных вариантов САР в частотной области. Частотные характеристики САР по каналу контролируемых возмущений представлены на рисунке 9.



**Рис. 9 – Результаты моделирования в частотной области обычной САР (1), инвариантной САР (2) и инвариантной САР с прогнозированием по кубическому сплайну (3)**

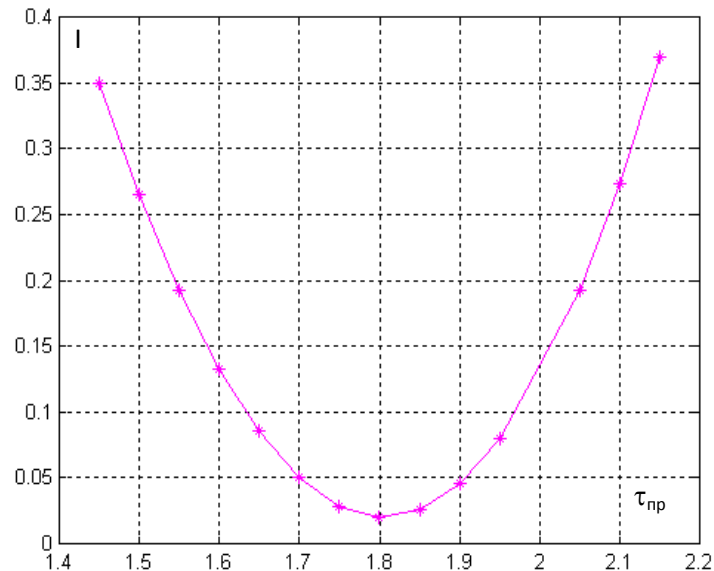
Значения интегрального квадратичного показателя качества для сравниваемых САР сведены в таблицу 1.

**Таблица 1 – Интегральные показатели эффективности САР**

Вар. САР	Значение критерия I
САР	27.79
САРИ	1.17
САРИК	0.02



Следует отметить, что качество работы САРИК значительным образом зависит от времени прогнозирования. На рисунке 10 представлена зависимость  $I$  от времени прогнозирования  $t_{пр}$  из которого видно, что 20% отклонение от номинального значения приводит к значительному росту  $I$ . Это вполне объяснимо, так как неправильно заданное время прогнозирования снизит точность реализации корректирующей связи в целом несмотря на применение более точного алгоритма прогнозирования.



**Рис. 10 – Зависимость критерия оптимальности от времени прогнозирования при начальных значениях параметров корректирующей связи.**

Результаты исследования САР с оптимальными параметрами корректирующих связей в целом подтверждают представленные результаты, но при отклонении времени прогнозирования  $t_{пр}$  от номинального значения в диапазоне  $\pm 20\%$  показатель качества  $I$  значительно возрастает и преимущество САРИК над САРИ значительно снижается.

### Выводы

Введение в корректирующую связь САР инвариантной к контролируемым возмущениям модуля прогнозирования на основе кубического сплайна позволяет в значительной мере повысить эффективность работы САР и снизить ошибки стабилизации в сравнении с инвариантными САР, где прогнозирование ведется на основе реальных форсирующих звеньев. Результаты моделирования показали, что интегрально квадратичный показатель качества уменьшается в несколько раз. Следует так же отметить, что эффективность САР с модулем прогнозирования по кубическому сплайну в значительной мере зависит от точности задания времени прогнозирования. Но эта зависимость имеет экстремальный характер и в условиях параметрической неопределенности ОУ оптимальное значение времени прогнозирования может быть найдено автоматически с использованием специальных экстремальных поисковых систем.

### Литература

- [1] Степанов М.Т., Хобин В.А. Прогнозирование вынужденного движения и его применение в системах гарантирующего управления // Автоматизация технологических и бизнес-процесов. – Одеса, 2011. – № 5-6. – С. 20 – 25
- [2] Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Синтез линейных прогностических алгоритмов регулирования // Новое в российской электроэнергетике. 2009. № 10. С. 40-44.
- [3] Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. 2011. № 4. С. 61-66.

### References

- [1] Stepanov, M. T. et al. "Prognozirovaniye vyinuzhdenного dvizheniya i ego primeneniye v sistemah gar-antiruyushchego upravleniya", *Avtomatizatsiya tehnologichnih ta biznes-protsesiv*, no.5-6, pp.20-25, 2011.
- [2] Pikina, G. A. et al. "Sintez lineynyih prognosticheskikh algoritmov regulirovaniya", *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike*, vol. 10., pp. 40-44, 2009
- [3] Pikina, G. A. et al. "Prognosticheskie tipovyye algoritmy regulirovaniya", *Teploenergetika*, vol. 4., pp. 61-66, 2011.