

УДК 681.53

Моделирование динамики работы системы экстремального регулирования с запоминанием экстремума

Ватаева Е.Ю.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ул. Большая Морская, 67, лит. А,

Санкт-Петербург, 190000, Россия

e-mail: 89217450004@bk.ru

Аннотация

В работе рассматривается вопрос моделирования динамики нелинейных систем автоматического управления (САУ) в переходных режимах. В качестве объекта выбрана система с экстремальными характеристиками т.е. система экстремального регулирования (СЭР). Рассматривается вопрос математического моделирования с использованием пакета прикладных программ Matlab/Simulink. Также в работе был разработан полунатурный комплекс СЭР с использованием платформы NI ELVIS – II совместно с языком графического программирования LabVIEW, приводятся результаты моделирования.

Ключевые слова: системы экстремального регулирования с запоминанием экстремума, моделирование, платформа NI ELVIS – II, математическое моделирование, графическое моделирование.

Бурное развитие техники приводит к повышению требований к качеству работы системы автоматического управления (САУ) и совершенствованию

технологий производства, которые в свою очередь обуславливают появление новых специфических классов динамических объектов с нелинейными как статическими, так и динамическими характеристиками. Обеспечение заданных показателей качества работы нелинейных САУ в переходных режимах представляет собой весьма сложную задачу. К таким системам относятся, в частности, системы с экстремальными характеристиками. СЭР широко используются в авиации, а именно при торможении колес, поскольку взаимодействие тормозящего колеса с поверхностью, по которой оно катится, имеет экстремальный характер. Построенная модель в данной работе может быть применена в изучении и разработки регуляторов для систем торможения [1- 6].

Основной задачей системы экстремально регулирования (СЭР) является автоматическое поддержание оптимального значения регулирующего воздействия, которое обеспечивает экстремальное значение координат, параметров объекта или какого – либо показателя эффективности процесса (минимальный расход некоторого материала или вещества, максимум мощности или коэффициента полезного действия и т.д.) при неконтролируемых и заранее неизвестных изменениях свойств самого объекта управления и его условий функционирования [7-12].

Задачу анализа динамики СЭР можно проводить, используя математическое моделирование, как правило, при таком подходе используют либо кусочно-линейную аппроксимацию, либо аналитическую. Однако трудность математического подхода связана с несколькими обстоятельствами. Прежде всего,

высокий порядок нелинейного дифференциального уравнения движения системы, адекватно воспроизводящего физику ее функционирования. Так, математическая модель процесса торможения колес тяжелого самолета класса ИЛ – 96 – 300, в зависимости от принимаемых допущений, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений 40 и более высоких порядков. Многие коэффициенты, входящие в уравнение, имеют сложную функциональную зависимость от большого количества параметров, например, зависимость коэффициента сцепления тормозящего колеса с опорной поверхностью от величины относительного проскальзывания (рис. 1) является экстремальной параметрически не стационарной характеристикой, которую достаточно сложно описать математически [13-1].

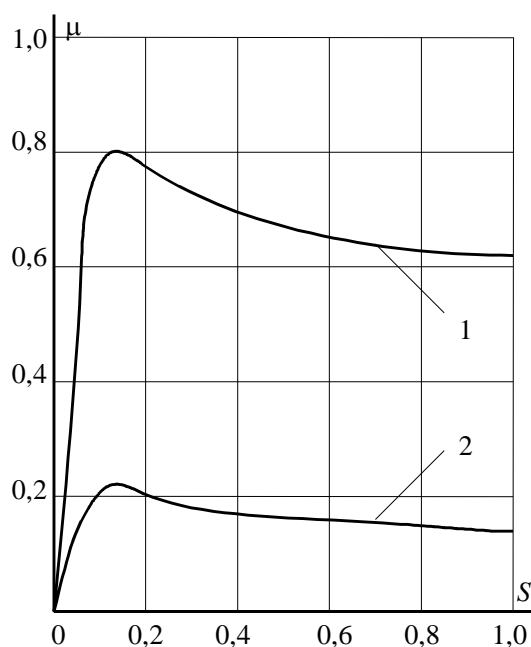


Рисунок 1 – Характеристика сцепления (1 – для сухой опорной поверхности; 2 – для мокрой опорной поверхности)

В прикладном пакете программ Matlab/Simulink была разработана схема системы экстремального регулирования с запоминанием экстремума (рис.2).

Сигнал, выходящий с объекта управления, поступает на ЗУ, которое фиксирует увеличение сигнала, далее ЗУ на ЭС непрерывно поступает сигнал $x_{з\text{у}}(t)$, который сравнивается с текущим значением $x(t)$. Когда разность между $x - x_{з\text{у}}$ сигналами достигает значения δ , то происходит срабатывание СР

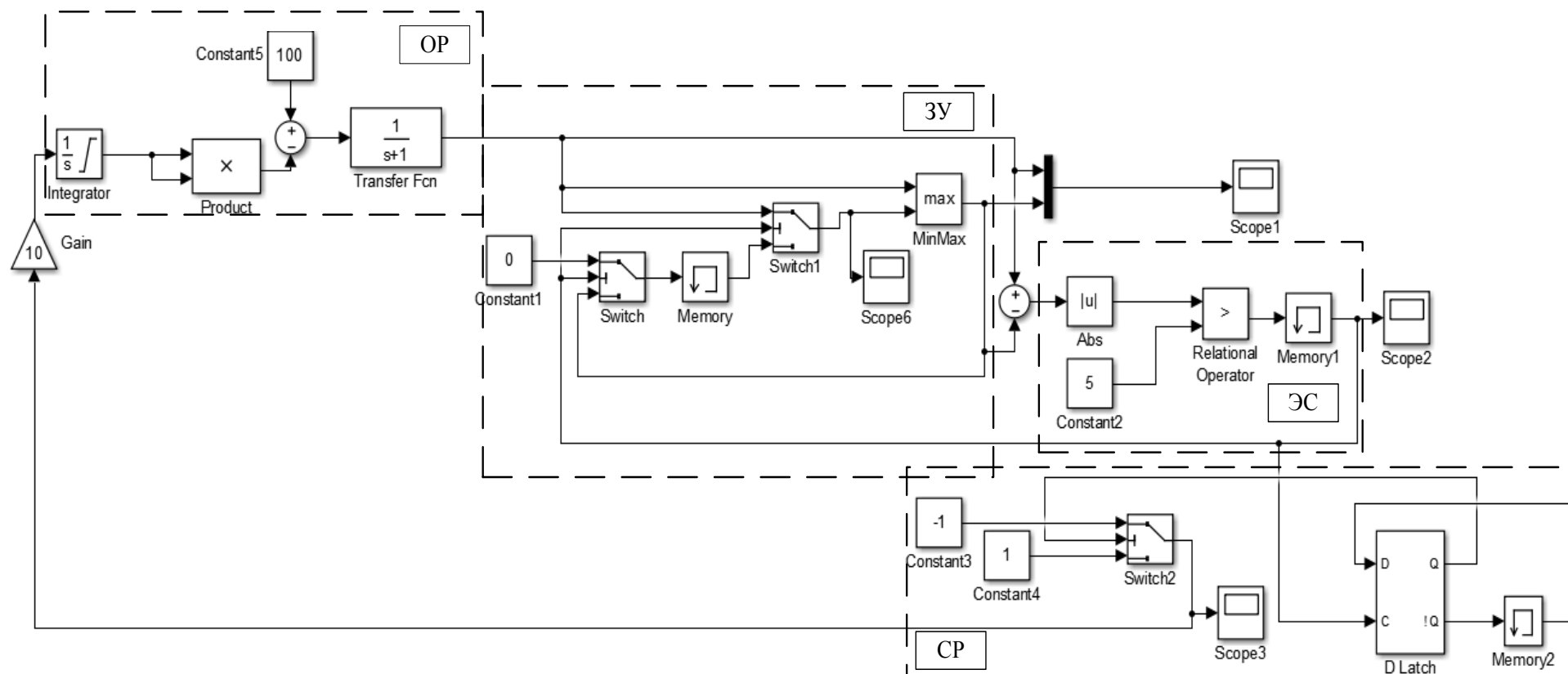


Рисунок 2 – СЭР с запоминанием экстремума

где ОР – объект регулирования, ЗУ – запоминающее устройство (пиковый детектор), ЭС – элемент сравнения, СР – сигнал – реле

Сигнал, выходящий с объекта управления, поступает на ЗУ, которое фиксирует увеличение сигнала, далее ЗУ на ЭС непрерывно поступает сигнал $x_{з\text{у}}(t)$, который сравнивается с текущим значением $x(t)$. Когда разность между $x - x_{з\text{у}}$ сигналами достигает значения δ , то происходит срабатывание СР.

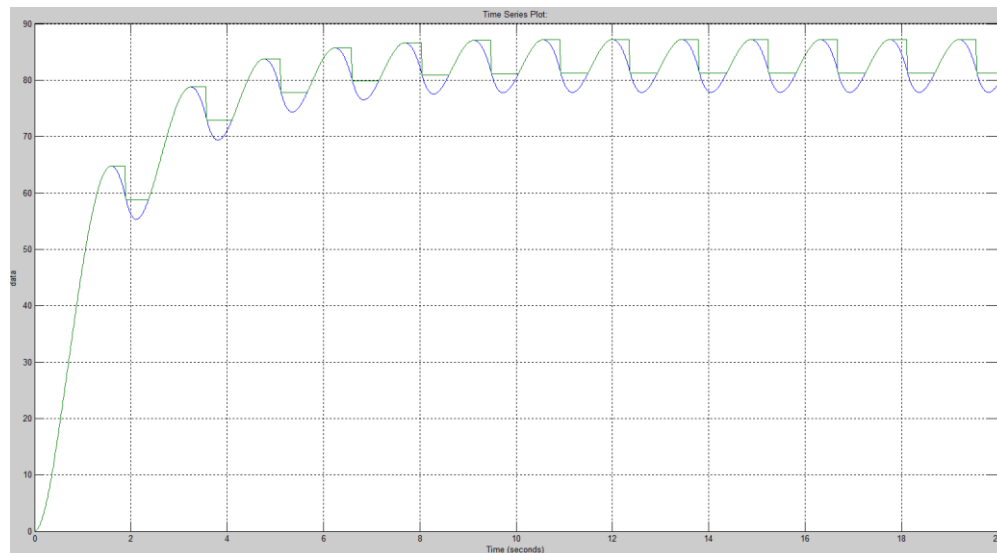


Рисунок 3 – Переходный процесс СЭР с запоминанием экстремума

На рис.3 представлен переходный процесс системы время, которого составляет $t_{\text{ин}} = 8$ секунд. Далее в системе устанавливаются устойчивые автоколебания.

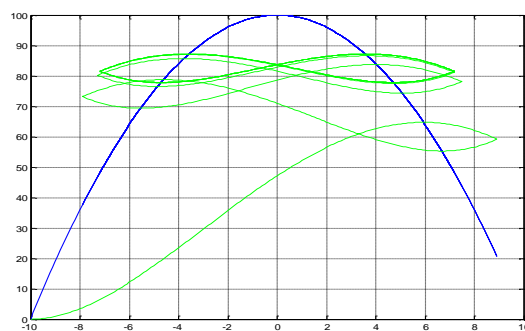


Рисунок 4 - Фазовые траектории при выходе СЭР к экстремум

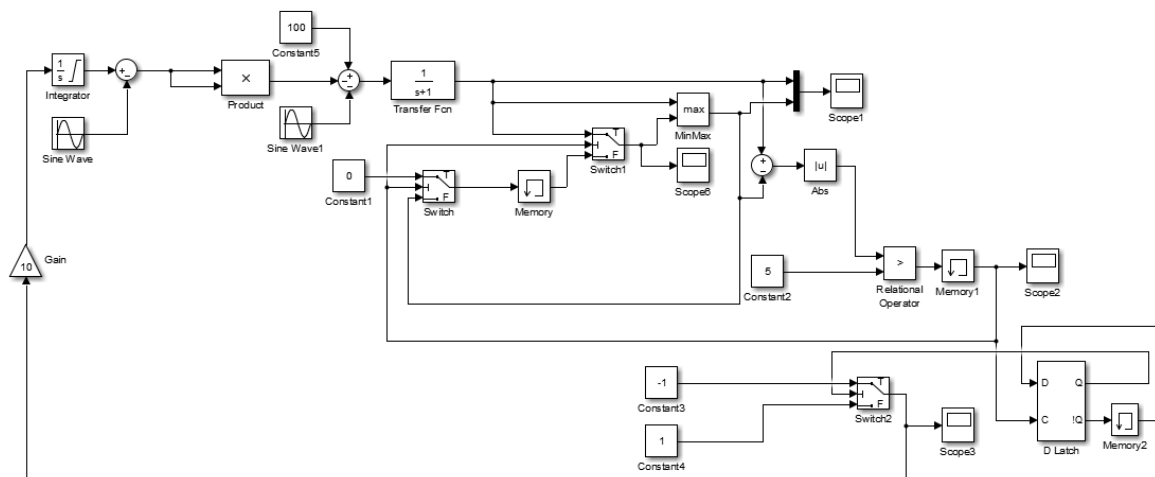


Рисунок 5 – СЭР с запоминанием экстремума с нестационарной нелинейной т
характеристикой

Различие между схемами на рис.2 и на рис.5 в том, что в схеме на рис.5 из библиотеки Matlab/Simulink были добавлены блоки SineWave, благодаря которым мы имеем возможность изменять положение параболы относительно осей x и y.

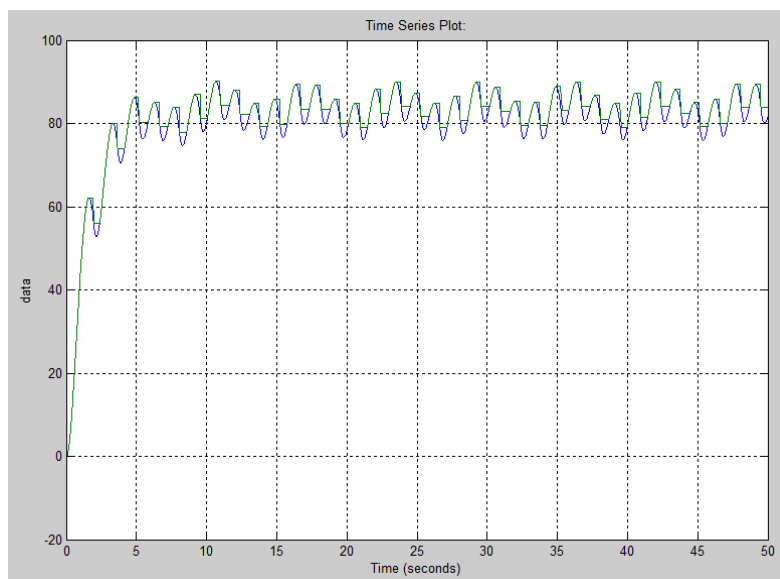


Рисунок 6 – Переходный процесс СЭР с запоминанием экстремума с
нестационарной нелинейной характеристикой при изменении координаты x

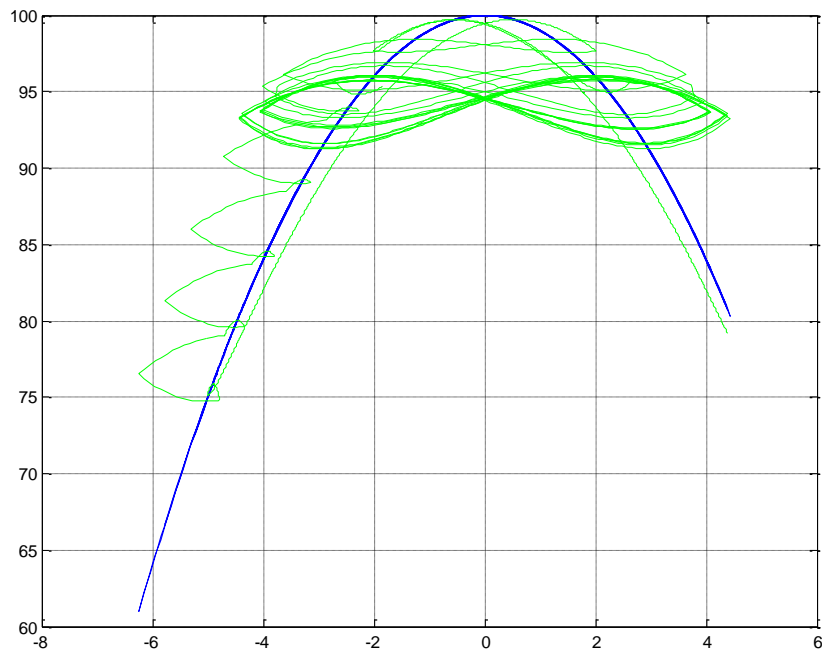


Рисунок 7 - Фазовые траектории при выходе СЭР к экстремуму

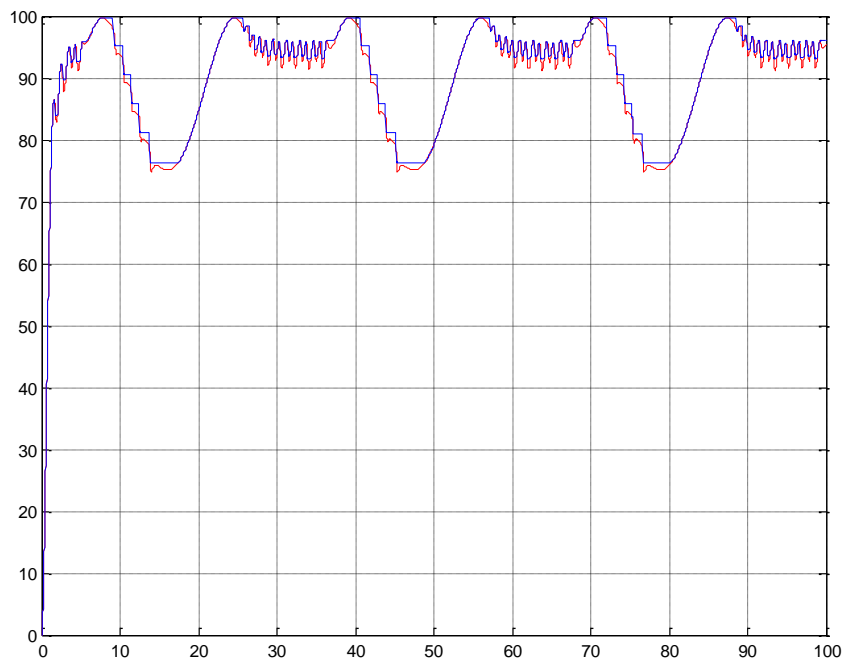


Рисунок 8 – Переходный процесс СЭР с запоминанием экстремума с нестационарной характеристикой

На естественные автоколебания регулятора накладываются колебания характеристики. В реальных системах девиация характеристики носят случайный характер. Если заранее известна заданная ошибка, то система будет отрабатывать процесс успешно. Если же отклонение по вертикали будет превышать заданную ошибку, то возникнут резкие переходы т.е. появление нового переходного процесса, который связан с поиском нового положения экстремума.

При анализе результатов моделирования необходимо учитывать, что программный пакет программ Matlab/Simulink вносит свои погрешности в получаемый результат, помимо указанных выше, связанных с аппроксимацией характеристик, а именно:

- шаг интегрирования подбирается автоматически;
- точность решения зависит от того метода интегрирования, который заложен разработчиками в пакет;
- ограниченность библиотеки нелинейных характеристик Matlab/Simulink не всегда дает возможность с достаточной степенью точности аппроксимировать исходную экстремальную характеристику;
- требуется разработка достаточно сложных подгружаемых модулей, обеспечивающих параметрическую нестационарность характеристики сцепления.

Как было упомянуто выше, поскольку программный пакет программ Matlab/Simulink вносит свои погрешности в получаемый результат, то предлагается, для анализа динамики СЭР, использовать платформу NI ELVIS –II и программное обеспечение LabVIEW, т.е. полунатурное моделирование [18,19].

Структура стенда, реализующего СЭР, приведена на рис. 9 и включает в себя два функционально идентичных канала — программный и аппаратный, объединенных посредством коммутатора. На рисунке приняты следующие обозначения: АМО — аппаратная модель объекта; АР — аппаратный регулятор; ПМО и ПР — соответственно программные реализации объекта и регулятора. Структурная схема объекта управления показана на рис. 10. Объект включает в себя исполнительный механизм (1), блок формирования изменяемой экстремальной характеристики (2) и линейную часть (3). Коммутатор позволяет получить все возможные сочетания программных и аппаратных узлов, а также объединить обе части стенда для построения двумерной экстремальной системы .

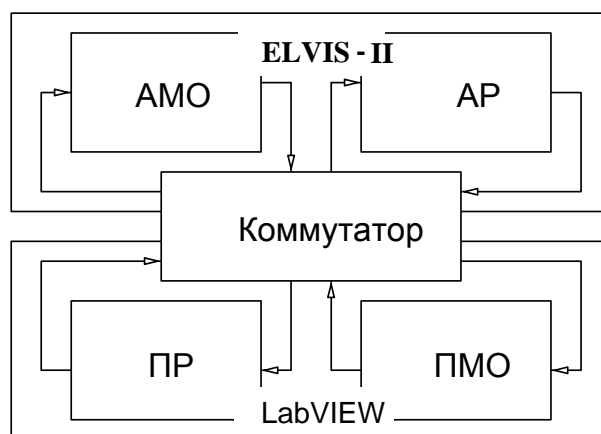


Рисунок 9 - Структура стенда, реализующего СЭР

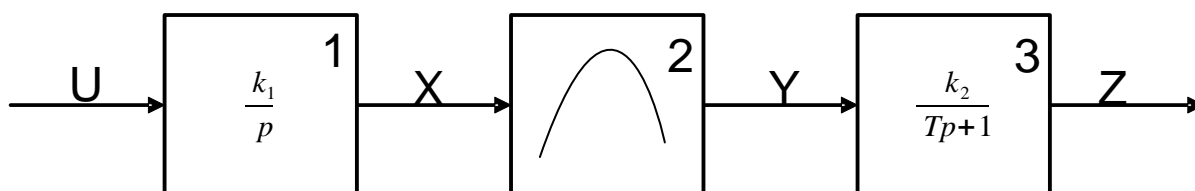
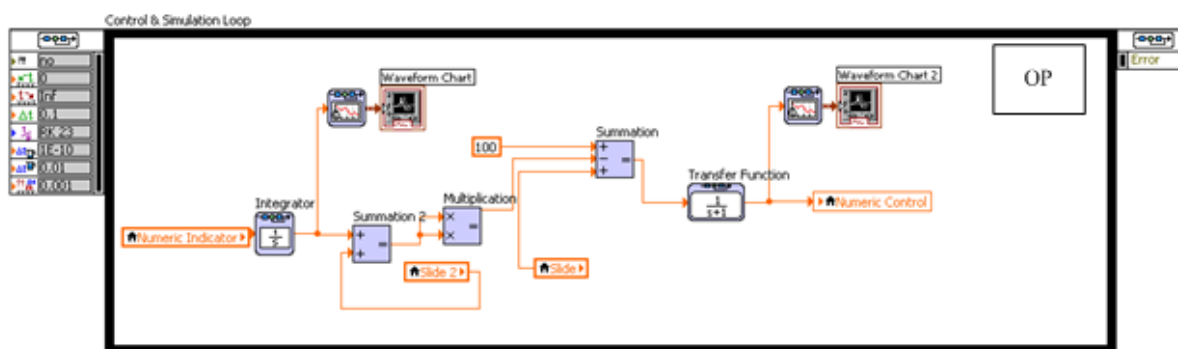


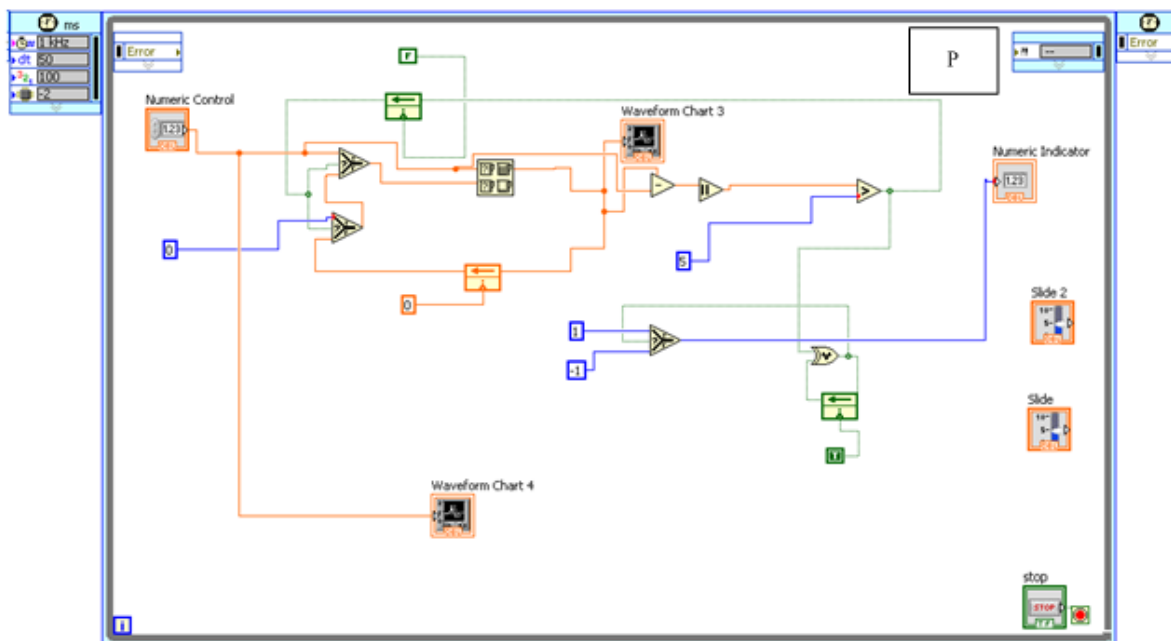
Рисунок 10 - Структурная схема объекта управления

Представленная структурная схема реализации модели СЭР является универсальной и обладает широкими возможностями по решению задач моделирования. Аналоговая часть модели без упрощений и допущений воспроизводит нестационарную экстремальную характеристику, аппаратный регулятор имеет фиксированную структуру и ограниченные возможности настройки параметров, а программный регулятор позволяет моделировать законы управления САУ ТК любой степени сложности [20 - 22].

На рис.11 приведена функциональная схема программного регулятора, который включает в себя модели объекта регулирования и регулятора. В качестве объекта регулирования выбрана система экстремального регулирования с запаздыванием.



а) Модель объекта регулирования



б) Модель программного регулятора

Рисунок 11 – Фрагменты программного регулятора

На рис.12 приведены фазовый портрет и процесс, проходящий в аппаратной модели объекта .

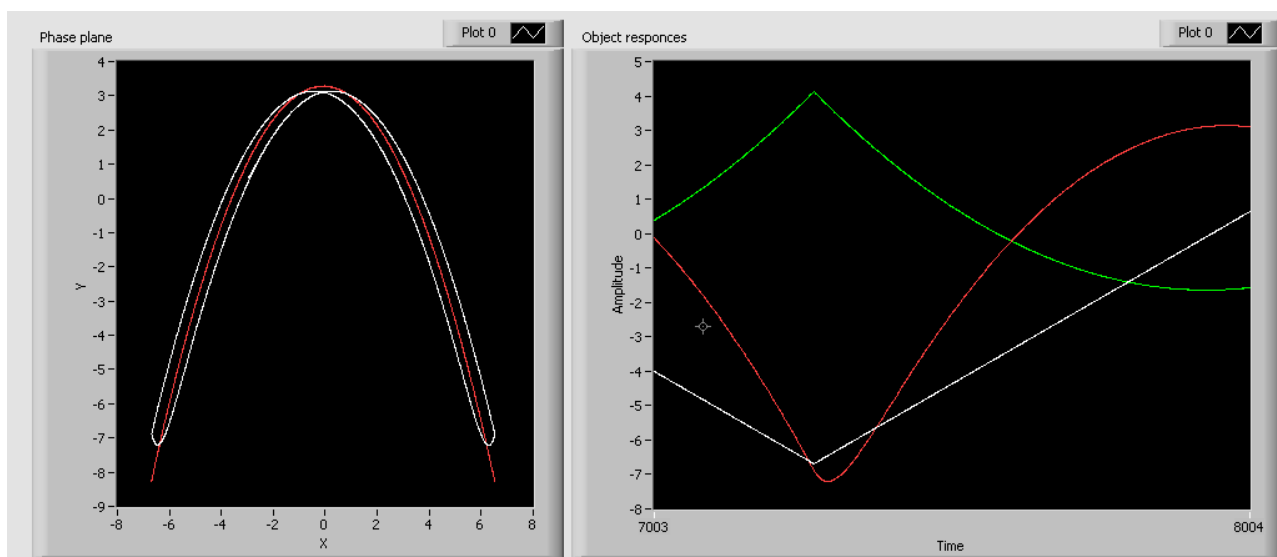


Рисунок 12 – Фазовый портрет и процесс в аппаратной модели объекта

Интерфейс программной части модели показан на рис.13, где обозначено:

Symmetry – симметрия экстремальной характеристики; *Xoffset* – смещение характеристики по координате x ; *Yoffset* – смещение характеристики по координате y ; *Slope* – крутизна характеристики; k_i – коэффициент усиления; *Err* – ошибка; T_{2c} – постоянная времени апериодического звена. Используя движки *Xoffset* и *Yoffset*, можно изменять параметры параболы по координатам x и y есть вводить не стационарность экстремальной характеристики.

Аналоговая часть системы реализована на отладочной плате NI ELVIS - II и представлена на рис.14, где приняты следующие обозначения: 1 – движок, позволяющий перемещать параболу по оси x ; 2 – умножитель; 3 – устройство выборки/хранения (записывает/извлекает значения в блок 5) ; 4 – конденсатор запоминающего устройства системы ; 5 – компаратор; 6 – линейная часть объекта (апериодическое звено) ; 7, 8 – операционные усилители (ОУ) ; 9 – движок, изменяющий направление восьмерки; 10 – ОУ, на который поступает коэффициент наклона ветвей параболы ; 11 – движок, позволяющий перемещать параболу по оси y ; 12 – перемножитель, реализующий изменение наклонов ветвей; 13 – движок, регулирующий наклон ветви.

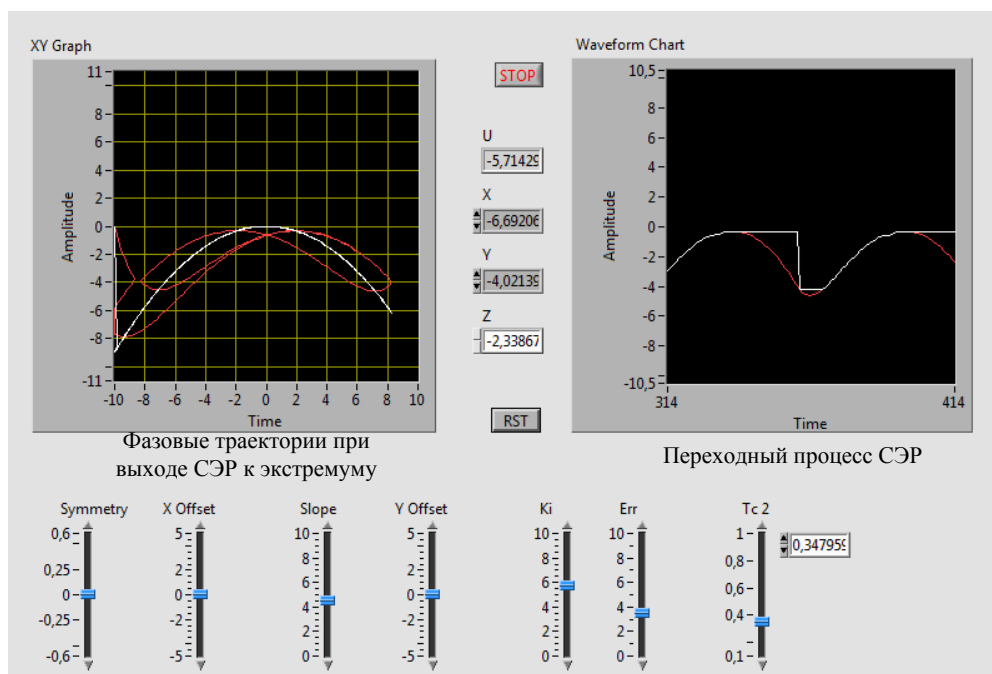


Рисунок 13 - Интерфейс управляющей программы макета

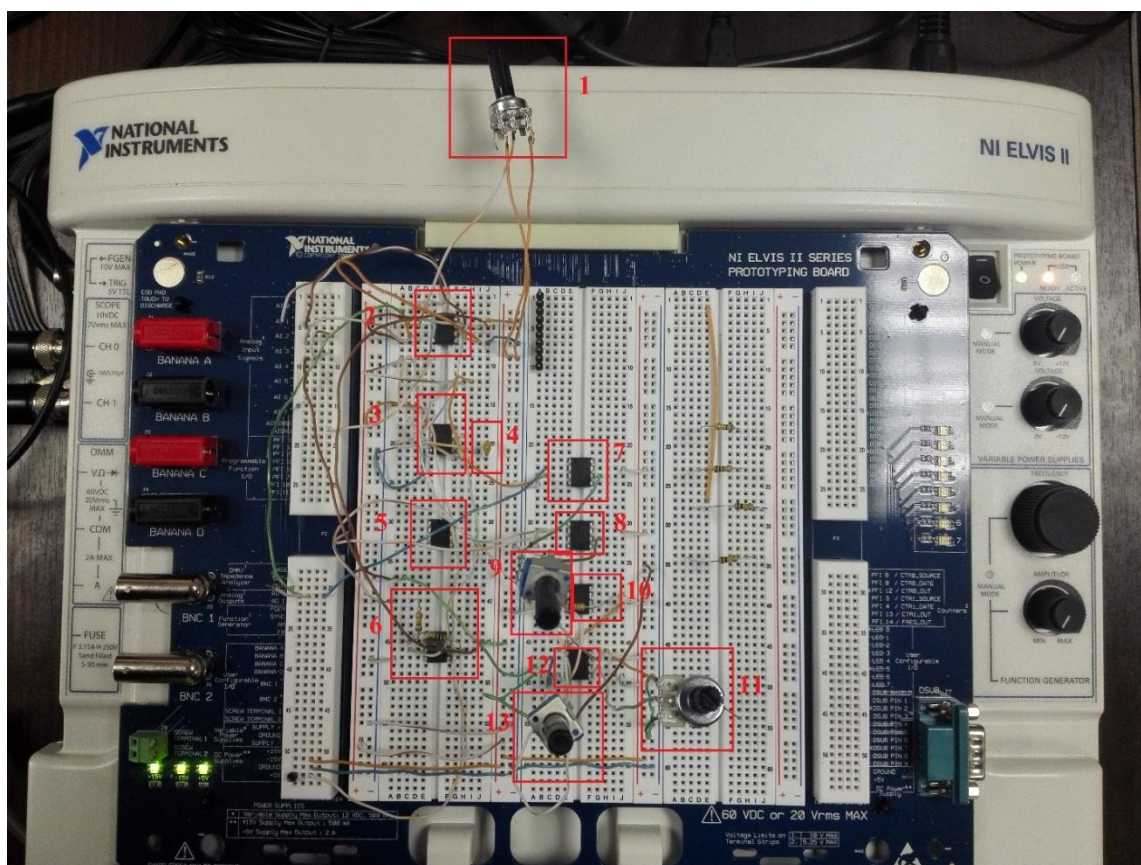
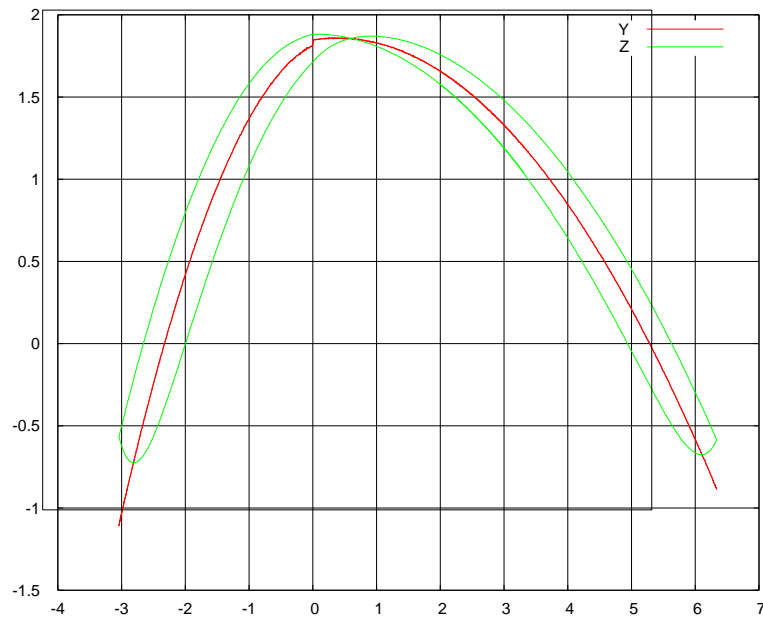
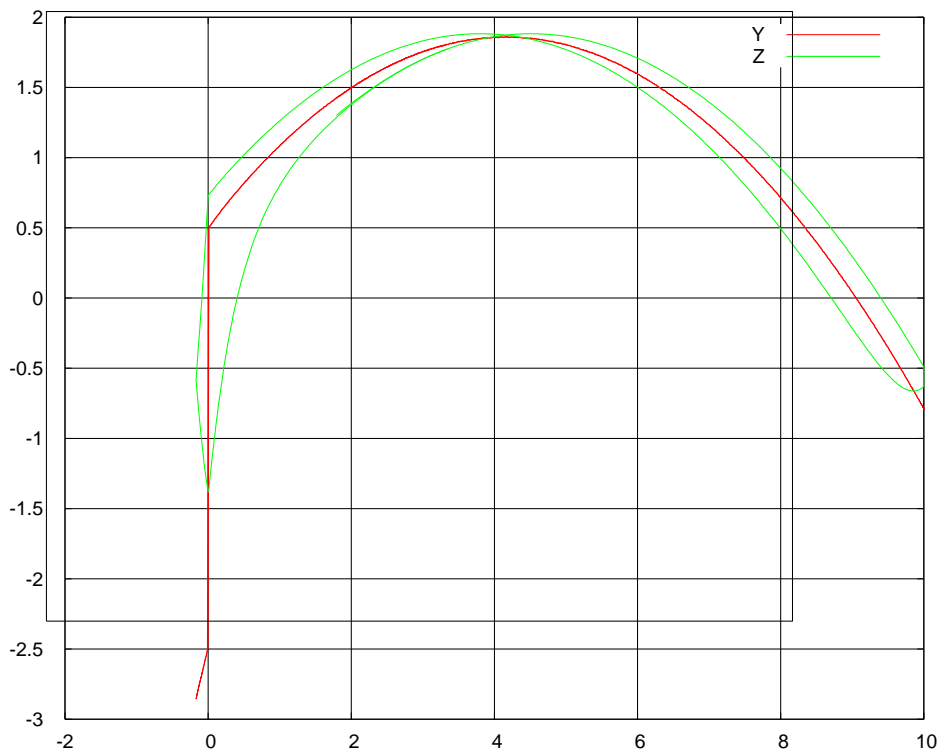


Рисунок 14 – Макет системы на отладочной плате NI ELVIS - II

На рис.15 (а, б, в, г) приведены осциллограммы работы аналоговой модели при различных параметрах объекта и разных настройках регулятора.



а) Искажение симметрии характеристики



б) Изменение величины смещения по x и y

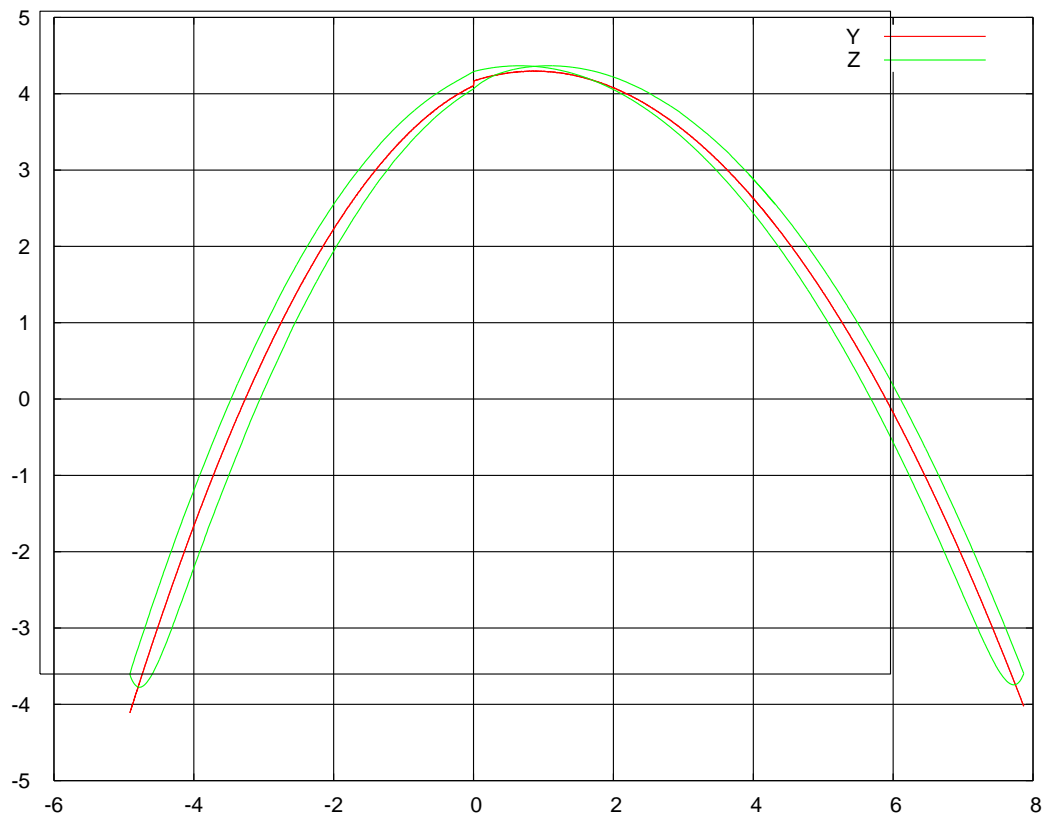
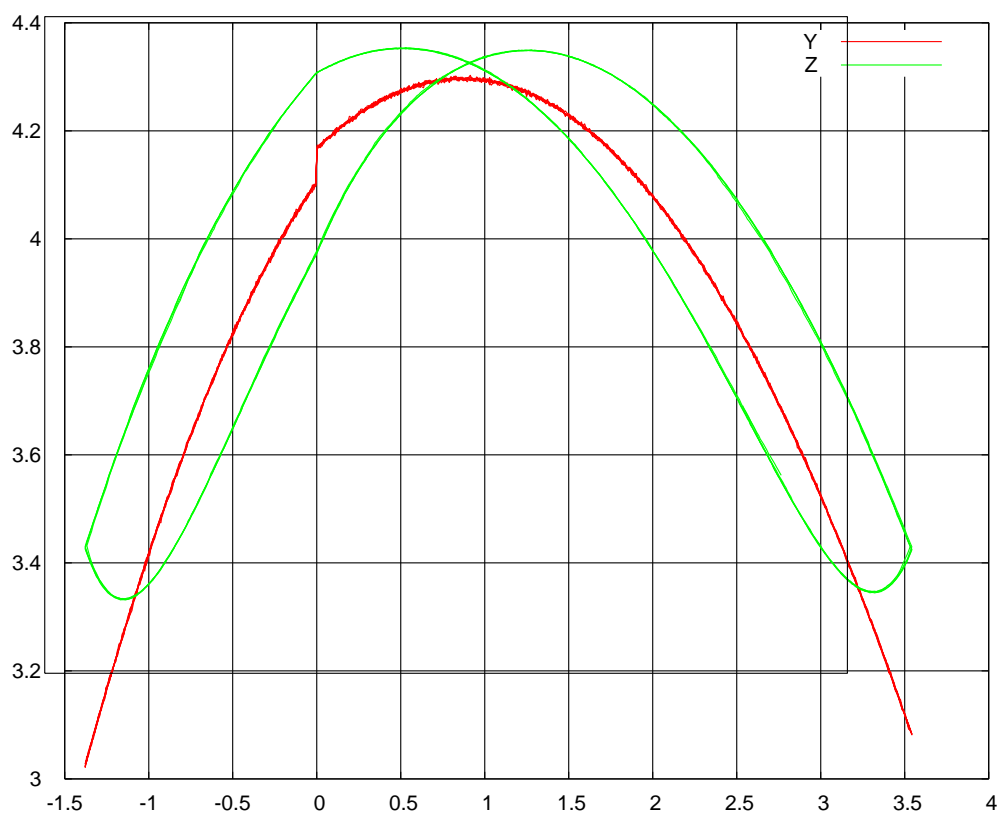
в) Влияние постоянной времени объекта на работу системы при $T_p = 0.1s$ г) Влияние постоянной времени объекта на работу системы при $T_p = 0.5s$

Рисунок 15 - Фазовые траектории при выходе СЭР к экстремуму

Полученные результаты показывают, что для решения задач моделирования динамики сложных, существенно нелинейных систем автоматического управления с экстремальными характеристиками в условиях их параметрической нестационарности целесообразно решать путем сочетания аналогового и компьютерного моделирования. Аналоговое моделирование позволяет в значимой степени упростить процесс исследования и модификации системы, устраняя недостатки использования математических методов. При этом давая возможность формировать экстремальные характеристики максимально приближенные к реальным, используя статическую и динамическую деформации, обеспечивает нестационарность экстремальной характеристики и позволяет работать в режиме реального времени. А компьютерное – дает возможность исследовать различные законы управления.

Библиографический список

1. Никитин А.В., Шишлаков В.Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления. - СПб.: ГУАП, 2003. - 358 с.
2. Шишлаков В.Ф., Шишлаков А.В., Тимофеев С.С. Синтез САУ при различных видах аппроксимации нелинейных характеристик: теория и практика. - СПб.: ГУАП, 2017. - 151 с.
3. Ибрагимов Д.Н. Аппроксимация множества допустимых управлений в задаче быстрогодействия линейной дискретной системы // Труды МАИ. 2015. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69797>

4. Урюпин И.В. Синтез оптимальных кусочно – гладких аппроксимаций траекторий движения летательных аппаратов // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93440>
5. Haskara I., Ozguner U., Winkelman J. Extremum control for optimal operating point determination and set point optimization via sliding modes // Journal Dynamic System, Measurement and Control, 2000, vol. 122, pp. 719 - 724.
6. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. - М.: Наука, 1972. – 576 с.
7. Hassan K. Khalil Nonlinear Systems, USA, Pearson Education Limited, 2013, 560 p.
8. Shankar Sarty. Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control, USA, Berkeley Publ., 1999, 675 p.
9. Slotine J.-J. E. Applied Nonlinear Control. USA, Prentice-Hall Publ., 1991, 259 p.
10. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. - М.: Наука, 1979. – 430 с.
11. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкредидзе Р.В., Мищенко Б.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. - М.: Наука, 1969. - 393 с.
12. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. - М.: Наука, 1969. – 408 с.
13. Шишлаков В.Ф., Чубраева Л.И. Синтез электромеханических систем автоматического управления при аппроксимации характеристик нелинейных элементов // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 2 - 8.

14. Шишлаков В.Ф., Цветков С.А., Шишлаков Д.В. Синтез параметров непрерывных и импульсных многосвязных систем автоматического управления: монография. - СПб.: СПбГУАП, 2009. -179 с.
15. Юшкевич А.В., Сазонов И.С., Мельников А.С., Петренко М.Л., Амельченко Н.П. Тормозные системы двухколесных транспортных средств // Вестник Белорусско-Российского университета. 2014. № 2 (43). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tormoznye-sistemy-dvuhkolesnyh-transportnyh-sredstv>
16. Шумилов И.С. Математическое моделирование системы торможения колёс шасси магистрального самолета // Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016. № 1. С. 24 – 42.
17. Бесекерский, В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1972. - 768 с.
18. Ватаева Е.Ю., Шишлаков В.Ф., Шишлаков Д.В., Решетникова Н.В. Синтез параметров законов управления нелинейных САУ при полиномиальной аппроксимации // Завалишинские чтения'18 (Санкт-Петербург, 16-20 апреля 2018). Сборник докладов. - СПб.:ГУАП, 2018. С. 114 – 118.
19. Шишлаков В.Ф., Криволапчук И.Г., Ватаева Е.Ю. Моделирование динамики работы систем экстремального регулирования (СЭР) // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2017. № 1. С. 130 – 132.
20. NI ELVIS II Series Quick Start Guide, National Instruments, December 2015.

21. Ватаева Е.Ю., Криволапчук И.Г., Шишлаков В.Ф. Гибридное моделирование СЭР на платформе ELVIS – II // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2017. № 5. С. 90 – 96.

22. Ватаева Е.Ю., Криволапчук И.Г., Шишлаков В.Ф. Полунатурный исследовательский комплекс систем экстремального регулирования // Завалишинские чтения'18 (Санкт-Петербург, 16-20 апреля 2018). Сборник докладов. - СПб.: ГУАП, 2018. С. 108 – 113.

Статья поступила в редакцию 20.12.2018