

Гл. ас. д-р. Йордан Константинов Кралев
конкурс за „доцент” по: 5.2 Електротехника, електроника и автоматика (Теория на автоматичното управление) към Факултет „Автоматика”, кат. „Системи и управление” на Технически университет – София, обявен в бр. 30 на ДВ. от 27.03.2026

Резюме на трудовете в група В

Десет от публикациите [В-1-В-10], публикувани в специализирани научни издания, са включени като равностойни на монографичен труд и могат да се обобщят в направлението

Идентификация и управление на многомерни системи с неопределени модели

Управлението в условия на неопределеност е основен проблем в съвременната теория и практика на управление. В статията [В-1], се представя метод за идентификация с неопределен модел на разпределението на плътността на популация в едномерен ограничен хабитат. Моделът е базиран на нелинейно реакционно-дифузионно частно диференциално уравнение от теорията на популационната динамика. Нелинейното частно диференциално уравнение се апроксимира с линейно нестационарно описание в пространство на състоянието от 120-ти ред с един вход и 100 изхода, където входната променлива е дължината на хабитата. Приложена е двоична случайна последователност като възбуждащ сигнал, симулиращ разширяване или свиване на хабитата. От събраната извадка данни се идентифицират 100 Вох-Jenkins (VJ) модела, описващи реакцията на плътността на популацията в различни точки на хабитата, с 80% съвпадение спрямо извадката данни за валидация. Тези VJ модели се обединяват в един неопределен линеен модел чрез усредняване на честотните им характеристики, с номинален модел от 12-ти ред и входна мултипликативна неопределеност, апроксимирана с минималнофазни филтри. Като принос към хабилитационния труд, статията предлага подход за представяне за целите на управлението на безкрайно мерните

системи описани с частни диференциални уравнения посредством линейни модели с неопределеност получени чрез методите за идентификация. Това улеснява проектирането на робастни регулатори за управление на биологични, епидемиологични или химични процеси.

В статията [B-2] се разработва робастен μ -регулатор (като H_∞ с D-K итерации) за позиционно следящо хидравлично задвижване с непряко управление, реализирано посредством мостова схема от бързопревключващи двупозиционни микроклапани. Това е нискобюджетна алтернатива на класическите пропорционалните хидро задвижвания, но при високочестотното превключване се предизвикват колебания в дебита на работната течност, което ограничава точността на позициониране в установен режим. Въз основа на нелинеен модел на хидравличната система се идентифицира модел с входна мултипликативна неопределеност базиран на Box-Jenkins структура от 8-ми ред, като границите на неопределеността са определени посредством трансформация на ковариационна матрица на параметрите. За дефинирането на изискванията към затворената система при μ -синтеза се използва схема със смесена чувствителност с тегловни филтри за грешката и за управляващия сигнал, които са настроени за минимизиране на грешката в ниски честоти и ограничаване на амплитудата на управлението в допустими граници, като е постигната стойност на μ 0.974. Синтезираният регулатор от 28-ми ред е декомпозиран на наблюдател на състоянието и обратна връзка по състояние, позволявайки извършване на анти-wind-up модификация чрез явно включване на ограниченото по амплитуда управление във вътрешната структура на синтезирания μ регулатор, с цел намаляване на пререгулирането при стъпаловидни задания. Регулаторът е реализиран в 32-битов промишлен контролер и експериментално тестван върху лабораторен стенд за електро-хидравлично кормилно управление. Като принос към хабилитационния труд, статията демонстрира пълен цикъл от идентификация с неопределени модели до робастно управление за нелинейни импулсни системи, с фокус върху индустриални приложения като хидравлични серво системи.

Теоретичните изследвания включват Теорема 1, доказваща връзката между идентифицирания вероятностен модел, и моделите със сигнално или параметрично представена неопределеност. Теорема 2, доказва чрез L2-анализ на произтичащите при μ синтеза уравнения на Рикати условие за анти-wind-up модификация на стандартен мю регулатор, която намалява влиянието на ограниченията по управление върху въведената интегрална съставка в регулатора, подобрявайки качеството без да компрометира робастността.

Статията [B-9] се разглежда проектиране и оптимално настройване на многомерен PID регулатор за електро хидравлична система с чувствителност по натоварване, използваща подобен на проектирания във [B-2] електрохидравличен пропорционален управляващ модул. При управлението на кормилната система [B-9] параметрите на регулатора не се задават ръчно, а се оптимизират чрез генетичен алгоритъм, за която класическите методи за начална настройка, като Ziegler-Nichols, не са директно приложими. В статията е използван идентифициран дискретен стохастичен модел на системата в пространство на състоянието, получен по експериментални данни. Синтезираният PID регулатор е с три входа и един изход, включващ грешка по позиция, сигнал за положението на пропорционалния разпределител и условна обратна връзка за anti-wind-up, а оптимизацията цели минимизация на квадратичен показател за качество. Експерименталните резултати показват, че оптимално настроеният PID регулатор осигурява бърз аperiodичен преходен процес, малка установена грешка и добро съвпадение между симулация и физически експеримент, като системата реагира дори по-бързо в реални условия от симулационния модел.

Получаването на модела на електрохидравличната кормилна система използван при синтеза на регулатора в [B-9] е изведен чрез методите за идентификация в [B-10], където основният резултат е получаването на линейни дискретен модел във пространство на състоянието с един вход и два изхода — позиция на плунжера на пропорционалния клапан и позиция на буталото на работния серво цилиндър. Идентификацията е проведена върху лабораторен стенд,

като възбуждането е реализирано чрез генериране на случайна двоична последователност като входно въздействие. Параметрите на модела в пространство на състоянието са оценени чрез метод на предсказаната грешка, а редът на модела е избран чрез анализ на Хенкилови сингулярни числа и проверка на корелационната функция на остатъците.

В статията [B-3], се описва лабораторен модел на хуманоиден робот с 17 степени на свобода, състоящ се от три подсистеми: механична, задвижваща и информационно-управляваща. Също така в статията [B-4] е разработен алгоритъм за координация с 13 последователни етапа, осигуряващи преместване напред на работа без падане чрез прехвърляне на проекцията на център на масите върху поддържащия полигон на краката. Алгоритъмът е вграден в 8 битов микроконтролер с генериране на C код и са проведени експериментални изследвания. Чрез методите за идентификация е получен модел на робота в пространство на състоянието с 10 входа (задания за серво моторите задвижващи краката) и 6 изхода (ъглови скорости за стъпалата). Идентифицираният модел в пространство на състоянието е от 24-ти ред, с ниска стойност на предсказана грешка и валидиран с независима извадка данни. За стабилизация по време на ходене се синтезира многомерен H_{∞} регулатор чрез решаване на линейни матрични неравенства за разширения модел на робота с тегловни филтри за грешката и управляващия сигнал. Постигната горна граница на H_{∞} на затворената система 2.45, с подтискане на товарни смущения до -60 dB в ниските честоти. Като принос към реабилитационния труд, статията предлага идентификационен подход за извеждане на модел на крачеци мобилни работи вместо класическото решаване на обратна задача на механиката или аналитични модели на обърнато махало, позволяващ робастно управление на хуманоидни работи. Също така в [B-8] се разглежда линейно-квадратичен регулатор за стабилизация на хуманоидния робот при ходене, като тегловните матрици Q и R са определени експериментално, за да се получи желан компромис между качество на стабилизация и ограничение по амплитуда на управляващите сигнали. За оценка на състоянието е синтезиран

филтър на Калман. Извършена е хардуерна симулация на алгоритъма за управление върху Arduino Mega 2560, като при това се наблюдават увеличена колебателност и време на затихване заради комуникационното закъснение, но като цяло има добро ниво на съвпадение със симулационните резултати.

В статията [B-5] се разработва многомерен модел за робастно управление на двуколесен робот, като целта на управлението е стабилизиране на робота във вертикално изправено положение чрез преместване на колелата. В разработеният лабораторен макет са налице динамични неопределености породени от еластичността на механичната конструкция, неточности при измерване с микромеханични инерциални сензори и ниската разрешаваща способност на енкодера за положението на колелата. Основният акцент е върху това, че вместо идентификация с класически едномерни модели се използва многомерна идентификация на модел с един вход и два изхода — ъглова скорост на колелата и наклон на тялото — което позволява по-пълно описание на динамиката и неопределеността. Реализиран е μ закон за управление от 15-ти ред, синтезиран върху дискретният модел при такт на дискретизация от 200 Hz и с добавена обратна връзка по интеграл на грешката от следене на траектория. Важна част от статията е сравнението с LQG-регулатор за същият робот от предишни изследвания, като е видно, че μ регулаторът осигурява по-широка честотна лента на затворената система, по-бързо отработване на грешката от следене и по-висок запас по робастна устойчивост, докато LQG показва по-добро потискане на шумовете в управляващото въздействие. Експериментите за вграждане на закон за управление в хардуерна платформа потвърждават, че времето за изчисление остава далеч под периода на дискретизация, а поведението на робота е без колебания, с малки грешки от следени и ограничени управляващи сигнали. От гледна точка на теорията на управлението приносът е в идентификацията на дискретен модел в пространство на състоянието от пети ред и последващото му преобразуване в модел с изходна мултипликативна неопределеност за всеки от двата изхода. Неопределеността се представя чрез честотно формящи филтри от трети ред. Тази работа показва как

структурата на неопределеността може да бъде извлечена от идентификацията и след това директно използвана в робастен синтез. Демонстрира се и предимството на моделите, които са специално проектирани за целите на синтезиране на управляващо устройство, пред моделите изведени от фундаментални закономерности.

Статията [B-6] разработва робастен μ регулатор за автоматично управление на концентрацията глюкозата при диабет от първи тип, изхождайки от нелинейния фармакокинетичен модел на Ховорка. Основната цел при идентификацията на модел за целите на управлението е да се определи модел с неопределеност, който едновременно отчита вариативността на физиологичните параметри между отделните индивиди, както и транспортното закъснение между плазменото и подкожното отчитане на концентрацията на инсулина и глюкозата, защото именно тези ефекти са критични за качеството на системите за автоматично дозиране на подкожен инсулин. Физиологичният процес е представен с неопределен линеен модел с една скаларна неопределеност, която после се преобразува в M- Δ форма за извършване на μ -синтез. Основен принос е формулиране на задачата за синтез при смесена чувствителност чрез избор на тегловните филтри за грешката от следене и управляващото въздействие, така че да се балансират времето за реакция на затворената система, потискане на дългосрочни смущения и ограничаване на управляващия сигнал. Синтезираният регулатор е получен чрез прилагане на (D,G)-К итерации, които намаляват консервативността при неопределености от реален тип. Извършен е и анализ за редукция на реда на управляващото устройство чрез Хенкилови сингулярни числа. Реда на контролера е успешно редуциран от 24-ти до 10-ти без съществена загуба на качество. На ниво резултати статията показва успешна работа на регулатора както върху линеаризирания и нелинейния модел, така и върху UVa/Padova симулатор за 10 възрастни субекта, включително при сценарии с не оповестени хранения. Средните стойности на концентрацията на глюкозата остават в целевия диапазон с преобладаващи периоди в зони А и В. Регулаторът от понижен ред запазва робастната устойчивост.

Обобщение на изложената инженерна философия за управление на сложни динамични системи в условия на неопределеност е направено с [В-7]. Разглежда се идентификацията на линейни модели с неопределеност и последващото им използване в робастен синтез на регулатори, като се търси и тяхната практическа приложимост за вградени системи за управление. Основната идея е, че когато аналитичното описание на процеса е непълно или неизвестно, моделът за управление трябва да бъде извлечен от експериментални данни чрез идентификация, а неопределеността да бъде формулирана така, че да е съвместима с теорията на робастното управление. Специално внимание е отделено на факта, че параметричната неопределеност с много на брой скаларни параметри често е непрактична за синтез, поради което се предпочита неструктурирана мултипликативна неопределеност, получена чрез честотни оценки на максималните относителни отклонения от номиналния модел. При идентификацията с неопределени линейни модел трябва да се търсят структури, които са достатъчно компактни за μ -синтез, но и достатъчно богати, за да бъдат обхванати реалните вариации на системата. Подчертава се и важноста на редуциране на реда на регулатора който бързо нараства поради високият ред на неопределените модели, реда на тегловните филтри и реда на апроксимиране на D часта при синтеза.

Научни приноси:

1. Разработен е общ подход за идентификация на сложни динамични системи чрез модели с неопределеност за целите на синтеза на робастни системи за управление, като е теоретично доказана еквивалентността на представяне на семейство модели с плътност на разпределение, с честотно зависима интервална неопределеност или със сигнална неопределеност.
2. Предложена е модификация в структурата на H_∞ регулатора получен при μ синтез и при въвеждане на интегрално действие на регулатора, която включва в явен вид ограничение по амплитуда на управляващия сигнал, така че да се намали ефекта от насищане на интегралната съставка в условия на ограничения по

амплитуда в изпълнителното устройство, като теоретично са изведени условията, при които нормата на управлението генерирано от модифицирания регулатор е ограничена от нормата на немодифицирания регулатор.

3. Обоснована е методика за представяне на безкрайно мерни системи, описани с частни диференциални уравнения, чрез компактни линейни модели с неопределеност, извлечени от експериментални данни с методите на идентификацията и еквивалентни на представяне с линейни нестационарни модели.

Научно-приложни приноси:

1. Създадена е методика за проектиране на робастни регулатори за системи с неопределен модел, при която неопределеността се извежда директно от идентификацията и се използва в процеса на синтез.

2. Разработени са и експериментално проверени робастни μ -регулатори за хидравлични, мехатронни и биотехнически системи, като е доказана ефективността на подхода в реални условия.

3. Предложен е идентификационен подход за хуманоиден робот, при който динамичният модел за целите на стабилизация и управление на работа се получава чрез експериментално извеждане, вместо чрез класическо решаване на обратна задача на кинематиката.

4. Показано е как многомерни и неопределени модели могат да се използват за проектиране на стабилизация на двуколесни или крачеши работи с различна структура и степен на свобода.

Приложни приноси:

1. Реализирани са работещи робастни системи за управление в промишлени и лабораторни условия, включително електрохидравлични, двуколесни и хуманоидни платформи.

2. Внедрени са цифрови регулатори в микроконтролери, индустриални контролери и FPGA платформи, което доказва приложимостта на разработените алгоритми в реално време.
3. Изградени са експериментални стендове и тестови конфигурации за оценка на устойчивостта, качеството на управление и поведението на системите при външни смущения.
4. Реализирани са практически решения за автоматизирано управление на движение при работи, включително координация на ходене и стабилизация на баланса.

No	Библиографични данни
1.	<p>J. Krlev. Uncertain Linear Stationary Model of Population Density in a Bounded Habitat, <i>IEEE Transactions on Control of Network Systems</i>, vol. 8(2), 2021, IF: 5, Q1</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85107178068</p>
2.	<p>J. Krlev, A. Mitov, Ts. Slavov. Robust μ-Controller for Hydraulic Spool Valve, Pilot Operated with Switching Micro Valves, <i>Energies MDPI</i>, 2021, vol. 14, 4817, IF: 3.2, Q1</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85112309133</p>
3.	<p>S. Sherif, J. Krlev, Ts. Slavov. Design of the H_{∞} regulator for the stabilization of humanoid robot during walking, <i>AIP Conference Proceedings</i>, 2449, 02004, 2022,</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85138065660</p>
4.	<p>S. Sherif, J. Krlev, Ts. Slavov, V. Kunchev. Embedded Walking Algorithm for Biped Humanoid Robot with 17 Degrees-of-Freedom, <i>IOP Conference Series</i>:</p>

	<p><i>Materials Science and Engineering</i>, vol. 618, 2019, 012004</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85076083182</p>
5.	<p>Ts. Slavov, J. Kralev, P. Petkov, Multi-Output Identification and Robust Control of Two-Wheeled Robot, <i>Proceedings of 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2023, Rome, Italy</i></p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85177448717</p>
6.	<p>J. Kralev, Ts. Slavov, Robust μ-Controller for Automatic Glucose Regulation for Type I Diabetes Mellitus, <i>Mathematics MDPI</i>, 2023, vol. 11, 3856, IF: 2.2, Q1</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85176421499</p>
7.	<p>P. Pektov, T. Slavov, J. Kralev. Embedded robust control of multivariable plants, <i>IFAC-PapersOnLine</i>, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.436</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85080938774</p>
8.	<p>S. Sherif, T. Slavov, J. Kralev. Hardware-in-the-loop simulation on linear-quadratic controller for stabilization of a humanoid robot during walking, <i>Proceedings of 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021</i>, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460279</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85114204519</p>
9.	<p>A. Mitov, T. Slavov, J. Kralev, Il. Angelov. GA-tuning of Multivariable PID Controller for Electrohydraulic Load-Sensing Servo System, <i>E3S Web of Conferences</i>, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132704001</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85133969010</p>

10.	A. Mitov, T. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov. Identification of electro-hydraulic load-sensing servo system. Engineering for Rural Development, 2021, doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF356 https://www.scopus.com/pages/publications/85112862681
-----	--

Резюме на трудовете в група Г7 и Г8

1. Реализация на системи за управление в различни програмируеми платформи

Статията [Г8-1] представя техника за GPU-in-the-loop симулация на линейни контролери в Simulink, като използва библиотеката Microsoft Accelerated Massive Parallelism (AMP) за паралелно изпълнение на модели в пространство на състоянията. Тя адресира ограниченията на CPU при обработка на големи матрици в системи за управление, като предлага S-функция (GPUStateSpace), която се активира при генериране на C код в Simulink. Блокът позволява SIMD паралелизация на изчисленията при симулиране на дискретни системи реализирани в пространство на състоянията. В примера се синтезира регулатор и наблюдател по желани полюси. Симулацията сравнява CPU и GPU реализации на идентични затворени контури. Основният принос е новият Simulink блок за GPGPU ускорение на линейни стационарни модели, приложим в сложни динамични симулации, без да нарушава качеството на затворената система. По подобен начин в [Г8-30] е разгледана паралелна реализация на физически реализируема предавателна функция в FPGA прибор, като е извършена дискретизация и избор на представяне на реалните числа във формат с фиксирана точност. Генериран е VHDL код от Simulink модела на дискретната реализация на предавателната функция и са проведени симулационни изследвания в симулатора на Xilinx за проверка на точността на направените апроксимации. Статията [Г7-1] предлага метод за

реализиране на аритметика с плаваща запетая върху FPGA чрез Simulink модели и автоматично генериране на VHDL код. Описани са две схеми съответно за събиране/изваждане и умножение на числа с единична точност по стандарта IEEE 754, където представянето на реалните числа е разделено на знак, експонента и мантиса, които се обработват с първични Simulink блокове. Моделите са тествани в Simulink и внедрени на Spartan 3 FPGA платформа, където работят с минимално закъснение, в рамките на един CLK такт поради реализацията, която използва предимно комбинаторна логика, без тригери.

Редица работи демонстрират реализация на сложни закони за управление в различни програмируеми платформи. В [Г8-2] се описват етапите за проектиране на робастни вградени системи с MATLAB и Simulink, фокусирайки се върху моделиране и синтез на LQG, LQ, H_∞ , μ регулатори с последващо генериране на C код за вграждане в микроконтролер. Там се подчертават етапите през които се преминава при реализация на сложни закони за управление, като се започне с математически модели, премине се към Simulink диаграми, SIL/HIL симулации и вграждане в платформи като DSP или FPGA.

Голяма част от експериментите са извършени с използване на 32 битов цифров сигнален процесор от фамилията C28x на TI. Използван е подход за автоматично генериране на управляващ C код от Simulink модел на регулатора. Полученият код се свързва със софтуерната конфигурация от базови управляващи модули за съответната хардуерна платформа. В [Г8-3] е вграден цифров регулатор за управление на аналогов модел. В [Г8-4] е реализирана система за управление на двуколесен робот с линейно-квадратичен регулатор и H_∞ филтър. В [Г8-9] са вградени линейно-квадратичен регулатор и H_∞ регулатор в 32 битов микроконтролер 32F407 на STM като вместо чрез генериране на код, тези управляващи алгоритми са описани директно като C програми.

В [Г8-5] цифровият сигнален процесор е използван като елемент от система за хардуерна симулация. При нея ПИД регулатор за система количка-махало е програмиран в цифровия процесор, а обекта е симулиран в Simulink. Изградена е

система за комуникация в реално време между цифров сигнален процесор и симулационния модел. Целта при хардуерната симулация е да се потвърди съответствието между хардуерната реализация на регулатора и заложеният математически модел на регулатора. Елементи от хардуерна симулация при управление на перфузионна помпа са докладвани и в [Г8-6].

Освен в цифров сигнален процесор, синтезираните сложни закони за управление могат да бъдат вградени и в стандартни промишлени логически контролери (PLC). В [Г8-7] е реализиран линейно квадратичен регулатор в специализиран промишлен контролер за управление на бавноходни мобилни машини, като е използван подход за автоматично генериране на ST код от Simulink модела на регулатора. В [Г8-13] е реализиран H_{∞} регулатор за същия лабораторен стенд с генериране на код от Simulink модела на регулатора и неговото вграждане като FB (функционален блок) компонент в средата за разработка на Danfoss. Също така при [Г8-19] е вграден чрез подобен подход и μ регулатор. В [Г8-25] е извършена реализация на каскадна система за регулиране с контури по позиция и налягане като са използвани блокове от стандартната библиотека на Plus1 интегрираната среда за разработка на софтуер за Danfoss. За да се осигури бързото прототипиране на регулатори в промишлени регулатори в [Г8-13] е лабораторна постановка която интегрира възможностите на промишления контролер за достъп до сензорите и изпълнителните механизми на платформата с управление чрез MATLAB/Simulink и CAN комуникация в реално време. При тази постановка, управляващото въздействие се изчислява в реално време в среда на Simulink и се изпраща по CAN към контролера, който го подава към съответен физически изход. Също така сензорните измервания се изпращат до Simulink модела в реално време.

Освен високопроизводителни процесори за вградени системи в редица работи са използвани и нискостойностни 8-битов микроконтролер от серията ATmega, реализирани върху платформа на Arduino. В [Г8-8] е синтезираният ПИ регулатор за управление на температурата на почвата за стайни растения е реализиран като C-програма за реално време. В [Г8-15] е реализирана система за

управление в реално време на крачещ робот със 17 степени на свобода като се извършва синхронизация по време на подадените към серво задвижванията на ставите команди и е организирана система за получаване и запис на сигнали в реално време. В [Г8-10] е реализирано управление на скоростта на безколекторен електродвигател като към Arduino платформата е свързан 3 фазов MOSFET силов преобразувател. Реализирана е управляваща софтуерна конфигурация за реално време, която използва хардуерните броячи на ATmega за отчитане на импулсите от енкодера, както и от Hall сензорите. Като сигналите от Hall сензорите директно генерират софтуерни прекъсвания, с цел извършване на необходимите комутации на фазите на безчетковия мотор. В прекъсване от таймер е реализиран дискретен ПИ регулатор за управление на скоростта на двигателя. Установена е и комуникация в реално време със Simulink за отчитане и запис на сигнали, както и за промяна на формата на заданието по скорост.

Научно-приложни приноси:

1. Разработена е методика за реализация и изследване на системи за управление чрез използване на възможностите на Simulink за генериране на C код за реално време от блок схемата на регулатора, който може да се свърже с инсталираната операционна система за работа в реално време или базовото софтуерно осигуряване на съответната програмируема платформа.

2. Предложен е подход за GPU-in-the-loop симулация на линейни регулатори и системи с дискретна реализация в пространство на състоянията, при който се демонстрира ефективно пренасяне на изчислителната тежест към паралелна архитектура от вида SIMD и се оценява поведението на управлението в реално време.

3. Изследвана е възможността за хардуерна реализация на алгоритми за управление върху FPGA чрез моделиране в Simulink и генериране на VHDL код, което свързва теоретичния синтез на линейни с цифрова реализация в паралелна изчислителна архитектура.

4. Предложена е архитектура за еднотактово изпълнение на базовите аритметични операции с плаваща точност събиране, изваждане, умножение и деление реализирани изцяло с комбинаторна логика и вградена в FPGA прибор.

Приложни приноси:

1. Реализирани са и експериментално валидирани множество системи за управление в реално време чрез вграждане на автоматично генерираният управляващ код за модела на регулатора в различни хардуерни платформи – цифрови сигнални процесори, промишлени контролери, 8 битови контролери.

2. Реализация и експериментална валидация на линейна дискретна система представена в пространство на състоянията в графичен процесор.

3. Реализация и експериментална валидация на аритметично логическо устройство за операции с плаваща точност в FPGA.

4. Реализация и експериментална валидация на система за хардуерна симулация с цифров сигнален процесор и комуникация по USB сериен интерфейс в реално време, както и на система за хардуерна симулация с промишлен контролер за мобилна хидравлика и CAN комуникация за реално време.

5. Вграждане на автоматично генериран ST код в промишлен контролер за мобилна хидравлика.

6. Управляваща система за реално време на безчетков електродвигател със сензори на Хол, с твърдо реално време реализирана върху 8 битов микроконтролер съчетаваща управление на комутацията, ПИ регулатор по скорост и поддържане на комуникационен канал в реално врем по серийна комуникация.

2. Синтез и приложение на линейно-квадратични закони, H_∞ и μ регулатори и на класически ПИД регулатори

Статията [Г8-4] представя моделно-базиран подход за управление на двуколесен робот с линейно квадратичен регулатор за вертикална стабилизация, в

който се използва H_∞ -филтър от 17ти ред за оценка на състоянията на модела. В [Г8-7] за управление на електрохидравлична кормилна система е синтезиран линейно-квадратичен регулатор с филтър на Калман за оценка на състоянията въз основа на модел от идентификация. В [Г8-9] е синтезиран линейно квадратичен и H_∞ регулатори за управление на флуид в резервоар и е направено сравнение между двата регулатора. В [Г8-11] е синтезиран линейно квадратичен регулатор за управление на концентрацията на глюкоза при диабет от първи тип при използване на модела на Ховорка и допускане за подкожно измерване на концентрацията на глюкоза и подкожна инфузия на инсулин. В [Г8-14] е изследван линейно-квадратичен регулатор за управление на електрохидравлична кормилна система при различни нива на товарно смущение, изпълнено като смущение по налягане в работните камери на серво цилиндъра.

Статията [Г8-3] разглежда идентификация и робастно управление на многомерни системи чрез моделиране на неопределеността по експериментални данни и H_∞ синтез на регулатор. В [Г8-13] също така е реализиран H_∞ регулатор, проектиран върху многомерен модел в пространство на състоянието, получен чрез идентификация. В сравнение с подобни решения системата използва допълнителна обратна връзка от LVDT сензор за положение на пропорционалния разпределител, което подобрява динамиката и точността на управлението. Изследвани са различни режими на работа, които потвърждават, че разработената система следи зададените команди за дебит. В [Г8-12] е изследвана робастната устойчивост на електрохидравлична кормилна система с H_∞ регулатор, като към многомерният модел на обекта е въведена мултипликативна неопределеност. В [Г8-17] е извършено сравнение на линейно квадратичен и H_∞ регулатор за електрохидравлична кормилна система с чувствителност по натоварване, а в [Г8-18] е направено сравнение и на робастната устойчивост на тези регулатори върху модел с неопределеност. В [Г8-19] е синтезиран робастен μ регулатор за електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи. Робастната устойчивост на електрохидравличния управляващ

модул с линейно квадратичен регулатор е също изследвана в [Г8-20] а с използване на H_{∞} регулатор в [Г8-21].

Както е известно, повечето от индустриалните системи за управление са реализирани като системи базирани на ПИД управлението. Затова обикновено при реализацията на сложни закони за управление винаги се търси сравнение с аналогична реализация, но с използване на класически ПИД закони.

В [Г8-5] е извършена оптимална настройка на параметрите на два ПИД регулатора за управление на системата количка-махало с използване на генетичен алгоритъм за оптимизация, който осигурява робастна устойчивост при изследване на неопределености в модела. Оптимална настройка чрез градиентен подход на цифров ПИД регулатор за електрохидравличен пропорционален разпределител с непряко управление с двупозиционни клапани е извършен в [Г8-23]. Робастен синтез на ПИ регулатор е направен и в [Г8-8] за управление на температура на почвата в комбинация с теоремата на крайните точки. В [Г8-6] налягането на перфузионната помпа се регулира също чрез ПИД управление в условията на променлив вискозитет на нелинейности в хидродинамиката. В [Г8-10] е използван ПИ закон за управление на скоростта на безчетков електродвигател. В [Г8-25] е проектирана каскадна система с ПИ регулатори по налягане и по позиция за електрохидравлична кормилна система. Също така, [Г8-26] показва синтез на ПИ регулатор с градиентен алгоритъм за оптимизация за електрохидравлична кормилна система върху експериментално получени модели в честотната област от 3ти и от 6ти ред. Влиянието на модела върху настройките на ПИ регулатор при електрохидравлични кормилни системи е изследвано в [Г8-27], като е извършено тяхното симулационно и експериментално сравнение. В [Г8-28] е направено симулационно изследване на хидравлична задвижваща система с ПИД управление и двупозиционни клапи при различен товар на изпълнителния цилиндър, като е анализиран автоколебателния режим. Системата за управление на кормилни устройства базирани на OSPE 200 с ПИ регулатор е представена и в [Г8-32].

Научно-приложни приноси:

1. Синтез на линейно-квадратичен регулатор с H_∞ -филтър за вертикална стабилизация на двуколесен робот по изведен със средствата на идентификацията неопределен модел от висок ред.

2. Синтез на линейно-квадратичен регулатор с филтър на Калман, H_∞ -регулатор и μ -регулатор за управление на позицията на електрохидравлична кормилна система и за управление на позицията на електрохидравличен управляващ модул, по изведени със средствата на идентификацията на системи модели.

3. Синтез на линейно-квадратичен и H_∞ регулатор за управление на ниво на флуид в резервоар.

4. Синтез на линейно-квадратичен регулатор с филтър на Калман за управление на концентрацията на глюкоза при диабет от първи тип.

3. Моделиране и идентификация на системи за управление

При моделно-базирания синтез на регулатори от особено значение за структурата и качествата на използвания математичен модел. Както е известно основните подходи за получаване на модели са или чрез използване на първични принципи от природните науки или чрез методите на идентификация от експериментални данни. Освен това, при синтеза на системи за управление обикновено се търси извеждане на специализирани модел за целите на управлението който да отчита в явен вид функционалната зависимост между управляващи величини и измерими величини. При това е необходимо да се моделира не само номиналната система но и да се оценят границите на немоделираната динамика в модела, така че затворената система да постига робастна устойчивост и робастно качество.

В [Г8-3] се разглеждат извеждането на модели с неопределеност на многомерни обекти с методите на идентификацията на системи, при което

неопределеността в модела се получава като апроксимация на доверителния интервал на честотните характеристики на обекта получени в идентификацията. Предложената методика е приложена върху аналогова моделираща система. В [Г8-8] е получен неопределен модел чрез получаване на множество преходни процеси в различни точки на измерване и тяхната параметрична апроксимация. В [Г8-7] е извършена идентификация с многомерни модели в пространство на състоянието на електрохидравлична кормилна система с прилагане на случайни входни въздействия. Аналогичен подход е приложен и при [Г8-9], където към получения линеен модел е добавена нелинейна статична характеристика на изпълнителния механизъм (помпа).

В [Г8-4] е получен нелинеен неопределен модел на системата количка-махало с един вход и два изхода, след което е получен е неопределен линеаризиран модел чрез аналитична линеаризация. Статията [Г8-15] представя два допълващи се подхода за моделиране на лабораторен модел на хуманоиден робот с 17 степени на свобода - пълен геометрично-физичен модел в Simulink/Simscape Multibody и модел, получен чрез идентификация на базата на експериментални данни. Изграден е и лабораторен модел на робота с 17 степени на свобода. Подход за извеждане на аналитичен модел е използван и в [Г8-6] за модел на хидродинамична система с перфузионна помпа и нанофилтрация на биологични течности. Моделирането е извършено в среда на Simulink с използване на блокове от SimHydraulics. В [Г8-11] аналитичният нелинеен фармакокинетичен модел на Ховорка е линеаризиран за избрана работна точка, за да бъде получен линеаризиран модел в пространство на състоянията. В [Г7-2], [Г8-23] и [Г8-24] е получен аналитичен модел на електрохидравличен управляващ модул с четири двупозиционни двупътни разпределителя за задвижване на серво цилиндър, който също е реализиран в Simulink блокове.

В [Г8-10] се описва идентификацията на безчетков постояннотоков електродвигател в честотната област чрез прилагане на синусоидални входове (0.01-1 Hz) и оценка на усилването и закъснението по фаза за получаване на

непараметрична амплитудно фазово честотна характеристика. След което тя е апроксимирана с параметричен модел от нисък ред. Аналогичен подход е приложен и в [Г8-26] за получаване на непараметрични и параметрични модели на електрохидравлична задвижваща система с цифрово управление.

Научно-приложни приноси:

1. Извеждане на модели с неопределеност на многомерни системи с методите за идентификация на системи и интервално описание на вариацията на честотните характеристики, като са получени модели на системата количка-махало, на аналогова моделираща система, на електрохидравлична кормилна система, на електрохидравличен управляващ модул, на хуманоиден робот.
2. Извеждане, числена реализация и експериментална валидация на аналитични модели на системи с използване на принципите на физическото моделиране, като са получени модели на перфузионна помпа с нанофилтрация, електрохидравличен управляващ модул, фармакокинетичен модел на концентрацията на глюкоза при диабет от първи тип.
3. Извеждане на непараметрични и параметрични модели в честотната област чрез изследване на реакцията на отворената система към входни въздействия с различна честота и амплитуда, като са получени модели на безчетков постоянен ток електродвигател и на електрохидравлична кормилна система

Научни публикации в Група Г7

No	Библиографични данни
1.	J. Krlev. Design of Floating-Point Arithmetic Unit for FPGA with Simulink.

	<p>Proceedings of 18th International Conference on Smart Technologies (EUROCON), 2019, Novi Sad, Serbia, doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861860</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85074194817</p>
2.	<p>A. Mitov, J. Kraley, T. Slavov, Il. Angelov. Analytical Modelling of Hydraulic Proportional Spool Valve Pilot Operated with Switching Micro Valves. Proceedings of 6th International Symposium on Environmental-Friendly Energies and Applications (EFEA), 2021, doi: 10.1109/EFEA49713.2021.9406252</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85105337552</p>

Научни публикации в Група Г8

No	Библиографични данни
1.	J. Kraley. GPU-In-The-Loop Simulation of Linear Controllers, Information Technologies and Control, vol. 3, 2019, pp. 27-32, ISSN 2367-5357, doi: 10.7546/itc-2019-0014
2.	П. Петков, Ц. Славов, Й. Кралев. Проектиране на робастни вградени системи за управление с MATLAB и Simulink. Годишник на ТУ-София, том. 68, кн. 2, 2018, стр. 235-244, ISSN 1311-0829
3.	Ц. Славов, Й. Кралев, Н. Христов, П. Петков. Идентификация и робастно управление на многомерни обекти, Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 371-380, ISSN 1311-0829
4.	Ц. Славов, Й. Кралев, Н. Христов, П. Петков. Управление на двуколесен робот посредством линейно-квадратичен регулатор и H_{∞} филтър, Годишник на ТУ-София, том 66, кн. 2, 2016, стр. 275-284, ISSN 1311-0829
5.	Ц. Славов, Й. Кралев, П. Петков. Хардуерна симулация на ПИД регулатор за

	управление на система количка-махало, Годишник на ТУ-София, том 67, кн. 2, 2017, стр. 233-242, ISSN 1311-0829
6.	Й. Кралев, Б. Иванов, И. Иванов, А. Йончев, Д. Георгиева. Един подход за управление на перфузионна помпа при нанофилтрация. Годишник на ТУ-София, том 67, кн 2, 2017, стр. 279-288, ISSN 1311-0829
7.	A. Mitov, J. Kraley, Il. Angelov, Ts. Slavov. Identification and synthesis of linear-quadratic regulator for digital control of electrohydraulic steering system, 11 th International Fluid Power Conference (IFK), 2018, Aachen, Germany, ISBN 978-3-9816480-1.0
8.	В. Димитров, А. Козакова, Й. Кралев. Цифрово управление на температурата на почвата за стайни растения, Годишник на ТУ-София, том 67, кн. 2, 2017, стр. 243-252, ISSN 1311-0829
9.	В. Кънчев, Ц. Славов, Й. Кралев. Вградена система за управление на ниво на флуид в резервоар. Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр.8 289-298, ISSN 1311-0829
10.	Й. Кралев, Ш. Шериф. Вградена система за управление на скоростта на безколкаторен електродвигател чрез Arduino контролер. Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр. 255-262, ISSN 1311-0829
11.	Й. Кралев, Ш. Шериф, В. Кънчев, Ц. Славов. Линейно-квадратично управление на концентрацията на глюкоза при пациенти с диабет от първи тип. Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 297-305, ISSN 1311-0829
12.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Изследване робастната устойчивост на вграден H_{∞} регулатор за кормилна електрохидравлична задвижваща система, Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 325-334, ISSN 133-0829

13.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Стенд за изследване на системи за управление на кормилна електрохидравлична задвижваща система, Годишник на ТУ-София, том 70, кн. 4, 2020, стр. 67-76, ISSN 1311-0829, doi: 10.47978/TUS.2020.70.04.028
14.	А. Митов, Ц. Славов, Й. Кралев, И. Ангелов. Линейно квадратично управление на електрохидравлична кормилна система, Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр. 245-254, ISSN 1311-0829
15.	Sh. Sherif, J. Kraleв, Ts. Slavov. Modeling of a Humanoid Biped Robot through Different Approaches. Information Technologies and Control, vol. 4, 2019, p. 40-58, ISSN 2367-5357, doi: 10.7546/itc-2019-0020
16.	Ш. Шериф, Й. Кралев, Ц. Славов. Откриване на обекти в изображение чрез използване на MATLAB, Годишник на ТУ-София, том 70, кн. 4, 2020, стр. 49-58, ISSN 1311-0829, doi: 10.47978/TUS.2020.70.04.026
17.	Ts. Slavov, A. Mitov, J. Kraleв, Il. Angelov. Comparison of Multivariable Control Algorithms for Load-sensing Electro-hydraulic Servo System. Proceedings of Technical University of Sofia, vol. 71 (2), 2021, p. 7-13, ISSN: 2738-8549, doi: 10.47978/TUS.2021.71.02.008
18.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов Сравнителен анализ на робастната устойчивост на линейно-квадратичен и H_{∞} регулатор за електрохидравлична кормилна система. Сборник доклади от Национална научна конференция “75 години съюз на учените в България – в полза на науката и образованието”, МДУ “Фредерик Жолио-Кюри”, к.к. “Св. св. Константин и Елена”, Варна, 2019, стр. 222-228, ISBN 978-954-397-045-2
19.	Ал. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Вграден робастен μ -регулатор в електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи, Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2019”,

	Созопол, 2019, стр. 299-309, ISSN 1314-5371.
20.	A. Mitov, Ts. Slavov, J. Kralov, Il. Angelov. Investigation of robust stability of electro-hydraulic control module for hydraulic steering system with linear-quadratic regulator. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2018”, Русе, 2018, том 57, ISSN 1311-3321
21.	Ал. Митов, Ц. Славов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. ∞ регулатор на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи. Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2018”, Созопол, 2018, стр. 327-335, ISSN 1314-5371
22.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Стенд за изследване на електрохидравлична система за кормилна уредба с чувствителност по натоварване. Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2018”, Созопол, 2018, стр. 319-326, ISSN 1314-5371
23.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Моделиране в среда на Simulink на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства. Сборник доклади от научна конференция на “ЕМФ-2017”, Созопол, 2017, стр. 77-86, том 2, ISSN 1314-5371
24.	А. Митов, Ил. Ангелов, Й. Кралев. Проучване и анализ на съществуващи схемни решения на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства. Топлотехника, 2018, стр. 24-29, ISSN 1314-2550
25.	A. Mitov, J. Kralov, Il. Angelov. Digital cascade pressure and position regulator for electrohydraulic steering system. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2016”, Русе, 2016, стр. 183-189, ISSN 1311-3321
26.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Синтез и оптимална настройка на цифрови ПИ-регулатори по експериментални честотни характеристики за електрохидравлична кормилна система. Сборник доклади от научна конференция

	на “ЕМФ-2016”, Созопол, 2016, стр. 93-100, том 2, ISSN 1314-5371
27.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Оптимална настройка на цифрови ПИИ-регулатори по линеаризирани модели за кормилна електрохидравлична задвижваща система. Топлотехника, 2016, стр. 30-35, ISSN 1314-2550.
28.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Хидравлична задвижваща система с включен дискретен ПИД регулатор и импулсна модулация. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2014”, Русе, 2014, том 53, стр. 213-219, ISSN 1311-3321
29.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Идентификация на хидравлична задвижваща система с цифрово управление на изпълнителното устройство. Топлотехника, 2014, кн. 3, стр. 53-58, ISSN 1314-2550.
30.	K. Filipova, V. Yankov, F. Filipov, Y. Kraleв, T. Dimitrov. Investigating opportunities for hardware realization of transfer functions. Proceedings of International Scientific Conference “Computer Science”, 2011, Ohrid/Macedonia
31.	Il. Angelov, A. Mitov, J. Kraleв. Approach for the identification of hydraulic drive systems with digital control actuator. Journal of Food Packaging Science, Technique and Technologies, 2014, vol. 4, p. 30-35, ISSN 1314-7420
32.	A. Mitov, J. Kraleв, Il. Angelov. Digital Control of Electrohydraulic Steering Test Bench, Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies, 2015, vol. 7, p. 68-73, ISSN 1314-7773

Дата: 22.06.2026

Подпис:

/Й. Кралев/

Assit. Prof. Ph.D. Jordan Konstantinov Kralev
Competition for academic position „Associate Professor” in: 5.2 Electrical Engineering,
Electronics and Automation (Automatic Control Theory) at the Faculty of Automation,
Department of Systems and Control, Technical University of Sofia, announced in issue 30
of the State Gazette dated 27.03.2026

Summary of the works in Group V

Ten of the publications [V-1–V-10], published in specialized scientific journals, are considered equivalent to a monographic work and can be summarized within the field of

Identification and Control of Multivariable Systems with Uncertain Models

Control under conditions of uncertainty is a fundamental problem in modern control theory and practice. In article [V-1], a method is presented for identification with an uncertain model of the population density distribution in a one-dimensional bounded habitat. The model is based on a nonlinear reaction–diffusion partial differential equation from population dynamics theory. The nonlinear partial differential equation is approximated by a linear time-varying state-space representation of order 120 with one input and 100 outputs, where the input variable is the length of the habitat. A binary random sequence is applied as an excitation signal, simulating expansion or contraction of the habitat. From the collected data sample, 100 Box–Jenkins (BJ) models are identified, describing the response of the population density at different points of the habitat, achieving 80% fit with respect to the validation dataset. These BJ models are combined into a single uncertain linear model by averaging their frequency responses, with a nominal model of order 12 and input multiplicative uncertainty approximated by minimum-phase filters. As a contribution, the article proposes an approach for representing, for control design purposes, infinite-dimensional systems described by partial differential equations via linear models with uncertainty obtained through system identification methods. This facilitates the design of robust controllers for biological, epidemiological, or chemical processes.

In article [V-2], a robust μ -controller (similar to H_∞ with D–K iterations) is developed for a position-tracking hydraulic drive with indirect control, implemented via a bridge configuration of fast-switching two-position microvalves. This represents a low-cost alternative to classical proportional hydraulic drives; however, high-frequency switching induces flow oscillations of the working fluid, which limits positioning accuracy in steady-state conditions. Based on a nonlinear model of the hydraulic system, a model with input multiplicative uncertainty is identified using an 8th-order Box–Jenkins structure, where the uncertainty bounds are determined through a transformation of the parameter covariance matrix. To define the closed-loop performance requirements for μ -synthesis, a mixed-sensitivity framework is used with weighting filters for the tracking error and control signal. These filters are tuned to minimize low-frequency error while constraining the control amplitude within admissible limits, achieving a μ value of 0.974. The synthesized 28th-order controller is decomposed into a state observer and state feedback, enabling an anti-windup modification by explicitly incorporating the amplitude-limited control signal into the internal structure of the μ -controller. This reduces overshoot under step reference inputs. The controller is implemented on a 32-bit industrial controller and experimentally validated on a laboratory electro-hydraulic steering test bench. As a contribution, the article demonstrates a complete pipeline from identification with uncertain models to robust control of nonlinear systems, with emphasis on industrial applications such as hydraulic servo systems. The theoretical contributions include Theorem 1, which establishes the relationship between the identified probabilistic model and models with signal- or parameter-based uncertainty representations. Theorem 2, via L2-analysis of the Riccati equations arising in μ -synthesis, derives a condition for anti-windup modification of a standard μ -controller that reduces the influence of control saturation on the integral component, improving performance without compromising robustness.

Article [V-9] addresses the design and optimal tuning of a multivariable PID controller for a load-sensing electrohydraulic system, using an electrohydraulic proportional control module similar to the one designed in [V-2]. In the control of the

steering system described in [V-9], the controller parameters are not set manually but are optimized using a genetic algorithm, for which classical initial tuning methods such as Ziegler–Nichols are not directly applicable. The study employs an identified discrete stochastic state-space model of the system, obtained from experimental data. The synthesized PID controller has three inputs and one output, incorporating position error, the signal for the position of the proportional valve, and a conditional feedback loop for anti-windup. The optimization aims at minimizing a quadratic performance index. Experimental results show that the optimally tuned PID controller provides a fast aperiodic transient response, small steady-state error, and good agreement between simulation and physical experiment, with the system responding even faster under real conditions than predicted by the simulation model.

The model of the electrohydraulic steering system used in the controller synthesis in [V-9] was obtained using the identification methods described in [V-10], where the main result is the derivation of a linear discrete state-space model with one input and two outputs—namely, the position of the proportional valve plunger and the position of the piston of the working servo cylinder. The identification was carried out on a laboratory test bench, with excitation implemented by generating a random binary sequence as the input signal. The parameters of the state-space model were estimated using the prediction error method, and the model order was selected based on analysis of the Hankel singular values and validation via the residual correlation function.

In article [V-3], a laboratory model of a humanoid robot with 17 degrees of freedom is described, consisting of three subsystems: mechanical, actuation, and information-control. In article [V-4], an algorithm for coordination with 13 sequential stages is developed, ensuring forward motion without falling by transferring the projection of the center of mass onto the support polygon of the feet. The algorithm is implemented on an 8-bit microcontroller with automatic C code generation, and experimental studies have been conducted. Using identification methods, a model of the robot in state-space form is obtained, with 10 inputs (reference signals for the servo motors driving the legs) and 6 outputs (angular velocities of the feet). The identified

state-space model is of 24th order, with a low prediction error and validated using an independent dataset. For stabilization during walking, a multivariable H_∞ controller is synthesized by solving linear matrix inequalities for the extended robot model, including weighting filters for the error and control signals. An upper bound of H_∞ norm of 2.45 is achieved for the closed-loop system, with disturbance attenuation down to -60 dB at low frequencies. As a contribution to the habilitation work, the article proposes an identification-based approach for deriving models of walking mobile robots, instead of the classical solution of inverse mechanics problems or analytical inverted pendulum models, enabling robust control of humanoid robots. Additionally, in [V-8], a linear-quadratic regulator (LQR) is considered for stabilizing the humanoid robot during walking, where the weighting matrices Q and R are determined experimentally to achieve a desired trade-off between stabilization quality and control signal amplitude constraints. A Kalman filter is synthesized for state estimation. A hardware-in-the-loop simulation of the control algorithm is performed on an Arduino Mega 2560. Increased oscillations and settling time are observed due to communication delays, but overall there is a good level of agreement with the simulation results.

The article [V-5] develops a multivariable model for robust control of a two-wheeled robot, where the control objective is to stabilize the robot in an upright vertical position by moving the wheels. The developed laboratory prototype exhibits dynamic uncertainties arising from the elasticity of the mechanical structure, measurement inaccuracies from micromechanical inertial sensors, and the low resolution of the wheel position encoder. The main emphasis is that, instead of identification using classical single-variable models, a multivariable identification approach is employed for a model with one input and two outputs—wheel angular velocity and body tilt—which enables a more complete description of the dynamics and uncertainty. A 15th-order μ -controller is implemented, synthesized on the discrete model with a sampling rate of 200 Hz and augmented with integral feedback of the trajectory tracking error. An important part of the paper is the comparison with an LQG controller for the same robot from previous studies. It is shown that the μ -controller provides a wider closed-loop

bandwidth, faster tracking error response, and a higher robustness margin, while the LQG controller demonstrates better suppression of noise in the control input. Hardware implementation experiments confirm that the computation time remains well below the sampling period, and the robot's behavior is non-oscillatory, with small tracking errors and bounded control signals. From a control theory perspective, the contribution lies in identifying a fifth-order discrete-time state-space model and subsequently transforming it into a model with output multiplicative uncertainty for each of the two outputs. The uncertainty is represented by third-order frequency-shaping filters. This work demonstrates how the structure of uncertainty can be extracted from identification and then directly used in robust synthesis. It also highlights the advantage of models specifically designed for controller synthesis over models derived from fundamental physical laws.

The article [V-6] develops a robust μ -controller for the automatic regulation of glucose concentration in type 1 diabetes, based on the nonlinear pharmacokinetic Hovorka model. The main objective in model identification for control purposes is to determine a model with uncertainty that simultaneously accounts for variability in physiological parameters across individuals, as well as the transport delay between plasma and subcutaneous measurements of insulin and glucose concentrations, since these effects are critical for the performance of automated subcutaneous insulin delivery systems. The physiological process is represented by an uncertain linear model with a single scalar uncertainty, which is then transformed into $M-\Delta$ form for μ -synthesis. A key contribution is the formulation of the mixed-sensitivity synthesis problem through the selection of weighting filters for the tracking error and the control input, so as to balance closed-loop response time, attenuation of long-term disturbances, and limitation of the control signal. The synthesized controller is obtained by applying (D,G)-K iterations, which reduce conservatism in the presence of real parametric uncertainties. An analysis of controller order reduction using Hankel singular values is also performed. The controller order is successfully reduced from 24 to 10 without significant loss of performance. In terms of results, the paper demonstrates successful operation of the

controller on both the linearized and nonlinear models, as well as on the UVa/Padova simulator for 10 adult subjects, including scenarios with unannounced meals. The average glucose concentrations remain within the target range, with predominant time spent in zones A and B. The reduced-order controller preserves robust stability.

A generalization of the presented engineering philosophy for controlling complex dynamic systems under uncertainty is given in [V-7]. The identification of linear models with uncertainty is considered, along with their subsequent use in robust controller synthesis, with an emphasis on their practical applicability to embedded control systems. The main idea is that when the analytical description of the process is incomplete or unknown, the control model should be derived from experimental data through identification, and the uncertainty should be formulated in a way that is compatible with robust control theory. Particular attention is paid to the fact that parametric uncertainty with a large number of scalar parameters is often impractical for synthesis; therefore, unstructured multiplicative uncertainty is preferred, obtained via frequency-domain estimates of the maximum relative deviations from the nominal model. In the identification of uncertain linear models, one should seek structures that are sufficiently compact for μ -synthesis, yet sufficiently rich to capture the actual variations of the system. The importance of controller order reduction is also emphasized, as the order tends to grow rapidly due to the high order of the uncertain models, the order of the weighting filters, and the order required to approximate the D-part in the synthesis.

Theoretical Contributions:

1. A general approach has been developed for the identification of complex dynamical systems using models with uncertainty for the purpose of synthesizing robust control systems. The equivalence between representing a family of models via a probability density distribution, via frequency-dependent interval uncertainty, or via signal uncertainty has been theoretically proven.

2. A modification to the structure of the H_∞ controller obtained through μ -synthesis and with the inclusion of integral action has been proposed. This modification

explicitly incorporates an amplitude constraint on the control signal in order to reduce the effect of integrator saturation under actuator amplitude limitations. The conditions under which the norm of the control generated by the modified controller is bounded by the norm of the unmodified controller have been theoretically derived.

3. A methodology has been justified for representing infinite-dimensional systems described by partial differential equations through compact linear models with uncertainty. These models are derived from experimental data using system identification methods and are equivalent to representations using linear time-varying models.

Theoretical and applied contributions:

1. A methodology has been developed for designing robust controllers for systems with uncertain models, in which the uncertainty is derived directly from the identification process and incorporated into the synthesis procedure.

2. Robust μ -controllers have been developed and experimentally validated for hydraulic, mechatronic, and biotechnical systems, demonstrating the effectiveness of the approach under real-world conditions.

3. An identification approach for a humanoid robot has been proposed, where the dynamic model for stabilization and control purposes is obtained experimentally rather than through the classical solution of the inverse kinematics problem.

4. It has been shown how multivariable and uncertain models can be used to design stabilization strategies for two-wheeled or legged robots with varying structures and degrees of freedom.

Applied contributions:

1. Functional robust control systems have been implemented in both industrial and laboratory environments, including electrohydraulic, two-wheeled, and humanoid platforms.

2. Digital controllers have been deployed on microcontrollers, industrial controllers, and FPGA platforms, demonstrating the real-time applicability of the developed algorithms.

3. Experimental setups and test configurations have been constructed to evaluate stability, control performance, and system behavior under external disturbances.

4. Practical solutions for automated motion control in robots have been implemented, including walking coordination and balance stabilization.

No	Bibliography
1.	J. Krlev. Uncertain Linear Stationary Model of Population Density in a Bounded Habitat, <i>IEEE Transactions on Control of Network Systems</i> , vol. 8(2), 2021, IF: 5, Q1 https://www.scopus.com/pages/publications/85107178068
2.	J. Krlev, A. Mitov, Ts. Slavov. Robust μ -Controller for Hydraulic Spool Valve, Pilot Operated with Switching Micro Valves, <i>Energies MDPI</i> , 2021, vol. 14, 4817, IF: 3.2, Q1 https://www.scopus.com/pages/publications/85112309133
3.	S. Sherif, J. Krlev, Ts. Slavov. Design of the H_∞ regulator for the stabilization of humanoid robot during walking, <i>AIP Conference Proceedings</i> , 2449, 02004, 2022, https://www.scopus.com/pages/publications/85138065660
4.	S. Sherif, J. Krlev, Ts. Slavov, V. Kunchev. Embedded Walking Algorithm for Biped Humanoid Robot with 17 Degrees-of-Freedom, <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> , vol. 618, 2019, 012004

	<p>https://www.scopus.com/pages/publications/85076083182</p>
5.	<p>Ts. Slavov, J. Kralev, P. Petkov, Multi-Output Identification and Robust Control of Two-Wheeled Robot, <i>Proceedings of 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2023, Rome, Italy</i></p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85177448717</p>
6.	<p>J. Kralev, Ts. Slavov, Robust μ-Controller for Automatic Glucose Regulation for Type I Diabetes Mellitus, <i>Mathematics MDPI, 2023, vol. 11, 3856, IF: 2.2, Q1</i></p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85176421499</p>
7.	<p>P. Pektov, T. Slavov, J. Kralev. Embedded robust control of multivariable plants, <i>IFAC-PapersOnLine, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.436</i></p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85080938774</p>
8.	<p>S. Sherif, T. Slavov, J. Kralev. Hardware-in-the-loop simulation on linear-quadratic controller for stabilization of a humanoid robot during walking, <i>Proceedings of 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460279</i></p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85114204519</p>
9.	<p>A. Mitov, T. Slavov, J. Kralev, Il. Angelov. GA-tuning of Multivariable PID Controller for Electrohydraulic Load-Sensing Servo System, <i>E3S Web of Conferences, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132704001</i></p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85133969010</p>

10.	A. Mitov, T. Slavov, J. Kralev, Il. Angelov. Identification of electro-hydraulic load-sensing servo system. Engineering for Rural Development, 2021, doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF356 https://www.scopus.com/pages/publications/85112862681
-----	---

Summary of the works in Group G7 and G8

1. Implementation of Control Systems in Programmable Platforms

The article **[G8-1]** presents a technique for GPU-in-the-loop simulation of linear controllers in Simulink, using the Microsoft Accelerated Massive Parallelism (AMP) library for parallel execution of state-space models. It addresses CPU limitations in processing large matrices in control systems by proposing an S-function (GPUStateSpace) that is activated during C code generation in Simulink. The block enables SIMD parallelization of computations when simulating discrete systems implemented in state space. In the example, a controller and an observer are synthesized based on desired pole placement. The simulation compares CPU and GPU implementations of identical closed-loop systems. The main contribution is a new Simulink block for GPGPU acceleration of linear time-invariant models, applicable in complex dynamic simulations without degrading closed-loop performance. Similarly, **[G8-30]** examines a parallel implementation of a physically realizable transfer function on an FPGA device, where discretization is performed and a fixed-point representation of real numbers is selected. VHDL code is generated from the Simulink model of the discrete implementation of the transfer function, and simulation studies are conducted in the Xilinx simulator to verify the accuracy of the approximations. Article **[G7-1]** proposes a method for implementing floating-point arithmetic on FPGA using Simulink models and automatic VHDL code generation. Two architectures are described for addition/subtraction and multiplication of single-precision numbers according to the

IEEE 754 standard, where real numbers are represented by sign, exponent, and mantissa, each processed using basic Simulink blocks. The models are tested in Simulink and deployed on a Spartan-3 FPGA platform, where they operate with minimal latency—within a single clock cycle—due to an implementation that relies primarily on combinational logic without flip-flops.

A number of works demonstrate the implementation of complex control laws on various programmable platforms. In [G8-2], the stages for designing robust embedded systems using MATLAB and Simulink are described, focusing on the modeling and synthesis of LQG, LQ, H_∞ , and μ controllers, followed by automatic C code generation for embedding in a microcontroller. The study emphasizes the stages involved in implementing complex control laws, starting from mathematical models, progressing to Simulink diagrams, SIL/HIL simulations, and deployment on platforms such as DSPs or FPGAs.

A large portion of the experiments were carried out using a 32-bit digital signal processor from the TI C28x family. An approach was employed for automatic generation of control C code from a Simulink model of the controller. The resulting code is integrated with the software configuration consisting of basic control modules for the respective hardware platform. In [G8-3], a digital controller is embedded for the control of an analog model. In [G8-4], a control system for a two-wheeled robot is implemented using a linear-quadratic regulator and an H_∞ filter. In [G8-9], a linear-quadratic regulator and an H_∞ controller are embedded in a 32-bit STM32F407 microcontroller; instead of code generation, these control algorithms are implemented directly as C programs.

In [G8-5], a digital signal processor is used as a component of a hardware-in-the-loop simulation system. In this setup, a PID controller for a cart-pendulum system is implemented on the digital processor, while the plant is simulated in Simulink. A real-time communication system is established between the digital signal processor and the simulation model. The objective of the hardware-in-the-loop simulation is to verify the consistency between the hardware implementation of the controller and its underlying mathematical model. Elements of

hardware-in-the-loop simulation in the control of a perfusion pump are also reported in [G8-6].

In addition to digital signal processors, synthesized complex control laws can also be embedded in standard industrial programmable logic controllers (PLCs). In [G8-7], a linear quadratic regulator was implemented in a specialized industrial controller for controlling slow-moving mobile machines, using an approach for automatic generation of ST code from the Simulink model of the regulator. In [G8-13], an H_∞ regulator was implemented for the same laboratory setup, with code generated from the Simulink model and embedded as an FB (function block) component in the Danfoss development environment. Similarly, in [G8-19], a μ -regulator was embedded using a comparable approach. In [G8-25], a cascade control system with position and pressure loops was implemented using blocks from the standard library of the Plus1 integrated software development environment for Danfoss. To enable rapid prototyping of controllers in industrial controllers, [G8-13] presents a laboratory setup that integrates the capabilities of the industrial controller for accessing sensors and actuators of the platform with MATLAB/Simulink-based control and real-time CAN communication. In this setup, the control action is computed in real time within the Simulink environment and sent via CAN to the controller, which applies it to the corresponding physical output. Sensor measurements are also transmitted back to the Simulink model in real time.

In addition to high-performance processors for embedded systems, a number of works also employ low-cost 8-bit microcontrollers from the ATmega series, implemented on the Arduino platform. In [G8-8], a synthesized PI controller for soil temperature regulation in indoor plants is implemented as a real-time C program. In [G8-15], a real-time control system for a walking robot with 17 degrees of freedom is developed, where synchronization of the commands sent to the joint servo drives is achieved, and a system for real-time signal acquisition and logging is organized. In [G8-10], speed control of a brushless electric motor is implemented by connecting a three-phase MOSFET power converter to the Arduino platform. A real-time control software configuration is developed, utilizing the hardware counters of the ATmega to process

pulses from the encoder as well as from Hall sensors. The signals from the Hall sensors directly generate software interrupts to perform the required commutation of the brushless motor phases. A discrete PI controller for motor speed control is implemented within a timer interrupt. Real-time communication with Simulink is also established for signal monitoring and logging, as well as for modifying the form of the speed reference signal.

Theoretical and applied contributions:

1. A methodology has been developed for the implementation and study of control systems by utilizing Simulink's capabilities for generating real-time C code from the block diagram of the controller, which can be interfaced with an installed real-time operating system or the underlying software environment of the respective programmable platform.

2. An approach for GPU-in-the-loop simulation of linear controllers and discretely implemented state-space systems is proposed, demonstrating effective transfer of computational load to a SIMD-type parallel architecture and enabling evaluation of control performance in real time.

3. The feasibility of hardware implementation of control algorithms on FPGA is investigated through modeling in Simulink and generation of VHDL code, linking the theoretical synthesis of linear controllers with their digital realization in a parallel computing architecture.

4. An architecture is proposed for single-cycle execution of basic floating-point arithmetic operations—addition, subtraction, multiplication, and division—implemented entirely using combinational logic and embedded within an FPGA device.

Applied contributions:

1. Multiple real-time control systems have been implemented and experimentally validated by embedding automatically generated control code for the controller model

into various hardware platforms—digital signal processors, industrial controllers, and 8-bit microcontrollers.

2. Implementation and experimental validation of a linear discrete system represented in state space on a graphics processing unit (GPU).

3. Implementation and experimental validation of an arithmetic logic unit (ALU) for floating-point operations on an FPGA.

4. Implementation and experimental validation of a hardware-in-the-loop simulation system using a digital signal processor with real-time USB serial communication, as well as a hardware simulation system using an industrial controller for mobile hydraulics with real-time CAN communication.

5. Deployment of automatically generated Structured Text (ST) code into an industrial controller for mobile hydraulics.

6. A real-time control system for a brushless electric motor with Hall sensors, implemented with hard real-time constraints on an 8-bit microcontroller, integrating commutation control, a PI speed controller, and maintenance of a real-time serial communication channel.

2. Design and Application of LQR, H_∞ , μ and Conventional PID Controllers

The article [G8-4] presents a model-based approach for controlling a two-wheeled robot using a linear–quadratic regulator for vertical stabilization, in which a 17th-order H_∞ filter is used for state estimation. In [G8-7], a linear–quadratic regulator with a Kalman filter for state estimation based on an identified model is synthesized for controlling an electrohydraulic steering system. In [G8-9], linear–quadratic and H_∞ controllers are synthesized for fluid level control in a tank, and a comparison between the two controllers is performed. In [G8-11], a linear–quadratic regulator is synthesized for controlling glucose concentration in type 1 diabetes using the Hovorka model, assuming subcutaneous glucose measurement and subcutaneous insulin infusion. In [G8-14], a linear–quadratic regulator for controlling an electrohydraulic steering system is

investigated under different levels of load disturbance, implemented as pressure disturbances in the working chambers of the servo cylinder.

The article [G8-3] examines identification and robust control of multivariable systems through modeling uncertainty based on experimental data and H^∞ controller synthesis. In [G8-13], an H^∞ controller is also implemented, designed on a multivariable state-space model obtained via identification. Compared to similar solutions, the system uses additional feedback from an LVDT sensor measuring the position of the proportional valve, which improves the dynamics and control accuracy. Various operating modes are studied, confirming that the developed system tracks the prescribed flow commands. In [G8-12], the robust stability of an electrohydraulic steering system with an H^∞ controller is investigated, where multiplicative uncertainty is introduced into the multivariable model of the plant. In [G8-17], a comparison between a linear quadratic controller and an H^∞ controller for a load-sensing electrohydraulic steering system is performed, and in [G8-18], their robust stability is also compared on a model with uncertainty. In [G8-19], a robust μ -controller is synthesized for an electrohydraulic control module for digital control of hydraulic steering systems. The robust stability of the electrohydraulic control module with a linear quadratic controller is also studied in [G8-20], and with an H^∞ controller in [G8-21].

As is well known, most industrial control systems are implemented as systems based on PID control. Therefore, when implementing complex control laws, a comparison is usually sought with an analogous implementation that uses classical PID laws.

In [G8-5], an optimal tuning of the parameters of two PID controllers for controlling the cart–pendulum system is performed using a genetic optimization algorithm, which ensures robust stability under model uncertainties. Optimal tuning of a digital PID controller for an electrohydraulic proportional valve with indirect control via two-position valves is carried out in [G8-23] using a gradient-based approach. A robust PI controller synthesis is also presented in [G8-8] for soil temperature control in combination with the endpoint theorem. In [G8-6], the pressure of a perfusion pump is

regulated using PID control under conditions of variable viscosity and nonlinear hydrodynamic effects. In [G8-10], a PI control law is applied for speed control of a brushless electric motor. In [G8-25], a cascade control system with PI controllers for pressure and position is designed for an electrohydraulic steering system. Additionally, [G8-26] presents the synthesis of a PI controller using a gradient optimization algorithm for an electrohydraulic steering system based on experimentally obtained third- and sixth-order frequency-domain models. The influence of the model on PI controller tuning for electrohydraulic steering systems is investigated in [G8-27], including both simulation and experimental comparisons. In [G8-28], a simulation study of a hydraulic drive system with PID control and two-position valves is conducted under varying actuator cylinder loads, with analysis of the self-oscillatory mode. The control system of steering units based on OSPE 200 with a PI controller is also presented in [G8-32].

Theoretical and applied contributions:

1. Synthesis of a linear–quadratic regulator with an H^∞ filter for vertical stabilization of a two-wheeled robot, based on a high-order uncertain model derived using system identification methods.
2. Synthesis of a linear–quadratic regulator with a Kalman filter, an H^∞ controller, and a μ -controller for position control of an electrohydraulic steering system and for position control of an electrohydraulic actuation module, based on models obtained via system identification methods.
3. Synthesis of linear–quadratic and H^∞ controllers for fluid level control in a tank.
4. Synthesis of a linear–quadratic regulator with a Kalman filter for glucose concentration control in type 1 diabetes.

3. Modeling and Identification of Control Systems

In model-based controller synthesis, the structure and properties of the mathematical model used are of particular importance. As is well known, the main

approaches for obtaining models are either through the use of first principles from the natural sciences or through identification methods based on experimental data. Furthermore, in control system synthesis, the goal is usually to derive specialized models for control purposes that explicitly capture the functional dependence between control inputs and measurable outputs. In this context, it is necessary not only to model the nominal system but also to estimate the bounds of the unmodeled dynamics, so that the closed-loop system achieves robust stability and robust performance.

In [G8-3], the derivation of models with uncertainty for multivariable systems is considered using system identification methods, where the model uncertainty is obtained as an approximation of the confidence interval of the system's frequency characteristics derived during identification. The proposed methodology is applied to an analog simulation system. In [G8-8], an uncertain model is obtained by generating a set of transient responses at different measurement points and performing their parametric approximation. In [G8-7], identification with multivariable state-space models of an electrohydraulic steering system is carried out using random input excitations. A similar approach is applied in [G8-9], where a nonlinear static characteristic of the actuator (pump) is added to the obtained linear model.

In [G8-4], a nonlinear uncertain model of the cart–pendulum system with one input and two outputs is derived, followed by the derivation of an uncertain linearized model via analytical linearization. Article [G8-15] presents two complementary approaches for modeling a laboratory model of a humanoid robot with 17 degrees of freedom—a full geometric-physical model in Simulink/Simscape Multibody and a model obtained through identification based on experimental data. A laboratory prototype of the robot with 17 degrees of freedom has also been constructed. An analytical modeling approach is also used in [G8-6] for a hydrodynamic system with a perfusion pump and nanofiltration of biological fluids. The modeling is carried out in the Simulink environment using SimHydraulics blocks. In [G8-11], the analytical nonlinear pharmacokinetic Hovorka model is linearized around a selected operating point to obtain a state-space linearized model. In [G7-2], [G8-23], and [G8-24], an analytical model of

an electrohydraulic control module with four two-position, two-way directional valves for driving a servo cylinder is derived, which is also implemented using Simulink blocks.

In [G8-10], the identification of a brushless DC motor is described in the frequency domain by applying sinusoidal inputs (0.01–1 Hz) and estimating the gain and phase delay to obtain a nonparametric amplitude–phase frequency characteristic. This characteristic is then approximated by a low-order parametric model. A similar approach is applied in [G8-26] to obtain nonparametric and parametric models of a digitally controlled electrohydraulic drive system.

Applied and theoretical contributions:

1. Derivation of models with uncertainty for multidimensional systems using system identification methods and interval representation of frequency response variations, resulting in models of a cart–pendulum system, an analog modeling system, an electrohydraulic steering system, an electrohydraulic control module, and a humanoid robot.

2. Derivation, numerical implementation, and experimental validation of analytical system models using principles of physical modeling, resulting in models of a perfusion pump with nanofiltration, an electrohydraulic control module, and a pharmacokinetic model of glucose concentration in type 1 diabetes.

3. Derivation of nonparametric and parametric models in the frequency domain by studying the open-loop system response to input signals with varying frequency and amplitude, resulting in models of a brushless DC motor and an electrohydraulic steering system.

Publications in Group G7

No	Bibliography
1.	J. Krlev. Design of Floating-Point Arithmetic Unit for FPGA with Simulink. Proceedings of 18th International Conference on Smart Technologies (EUROCON), 2019, Novi Sad, Serbia, doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861860

	https://www.scopus.com/pages/publications/85074194817
2.	A. Mitov, J. Krlev, T. Slavov, Il. Angelov. Analytical Modelling of Hydraulic Proportional Spool Valve Pilot Operated with Switching Micro Valves. Proceedings of 6th International Symposium on Environmental-Friendly Energies and Applications (EFEA), 2021, doi: 10.1109/EFEA49713.2021.9406252 https://www.scopus.com/pages/publications/85105337552

Publications in Group G8

No	Bibliography
1.	J. Krlev. GPU-In-The-Loop Simulation of Linear Controllers, Information Technologies and Control, vol. 3, 2019, pp. 27-32, ISSN 2367-5357, doi: 10.7546/itc-2019-0014
2.	П. Петков, Ц. Славов, Й. Кралев. Проектиране на робастни вградени системи за управление с MATLAB и Simulink. Годишник на ТУ-София, том. 68, кн. 2, 2018, стр. 235-244, ISSN 1311-0829
3.	Ц. Славов, Й. Кралев, Н. Христов, П. Петков. Идентификация и робастно управление на многомерни обекти, Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 371-380, ISSN 1311-0829
4.	Ц. Славов, Й. Кралев, Н. Христов, П. Петков. Управление на двуколесен робот посредством линейно-квадратичен регулатор и H_{∞} филтър, Годишник на ТУ-София, том 66, кн. 2, 2016, стр. 275-284, ISSN 1311-0829
5.	Ц. Славов, Й. Кралев, П. Петков. Хардуерна симулация на ПИД регулатор за управление на система количка-махало, Годишник на ТУ-София, том 67, кн. 2, 2017, стр. 233-242, ISSN 1311-0829

6.	Й. Кралев, Б. Иванов, И. Иванов, А. Йончев, Д. Георгиева. Един подход за управление на перфузионна помпа при нанофилтрация. Годишник на ТУ-София, том 67, кн 2, 2017, стр. 279-288, ISSN 1311-0829
7.	A. Mitov, J. Krlev, Il. Angelov, Ts. Slavov. Identification and synthesis of linear-quadratic regulator for digital control of electrohydraulic steering system, 11 th International Fluid Power Conference (IFK), 2018, Aachen, Germany, ISBN 978-3-9816480-1.0
8.	В. Димитров, А. Козакова, Й. Кралев. Цифрово управление на температурата на почвата за стайни растения, Годишник на ТУ-София, том 67, кн. 2, 2017, стр. 243-252, ISSN 1311-0829
9.	В. Кънчев, Ц. Славов, Й. Кралев. Вградена система за управление на ниво на флуид в резервоар. Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр.8 289-298, ISSN 1311-0829
10.	Й. Кралев, Ш. Шериф. Вградена система за управление на скоростта на безколекторен електродвигател чрез Arduino контролер. Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр. 255-262, ISSN 1311-0829
11.	Й. Кралев, Ш. Шериф, В. Кънчев, Ц. Славов. Линейно-квадратично управление на концентрацията на глюкоза при пациенти с диабет от първи тип. Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 297-305, ISSN 1311-0829
12.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Изследване робастната устойчивост на вграден H_{∞} регулатор за кормилна електрохидравлична задвижваща система, Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 325-334, ISSN 133-0829
13.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Стенд за изследване на системи за управление на кормилна електрохидравлична задвижваща система, Годишник на ТУ-София, том 70, кн. 4, 2020, стр. 67-76, ISSN 1311-0829, doi: 10.47978/TUS.2020.70.04.028

14.	А. Митов, Ц. Славов, Й. Кралев, И. Ангелов. Линейно квадратично управление на електрохидравлична кормилна система, Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр. 245-254, ISSN 1311-0829
15.	Sh. Sherif, J. Kraleв, Ts. Slavov. Modeling of a Humanoid Biped Robot through Different Approaches. Information Technologies and Control, vol. 4, 2019, p. 40-58, ISSN 2367-5357, doi: 10.7546/itc-2019-0020
16.	Ш. Шериф, Й. Кралев, Ц. Славов. Откриване на обекти в изображение чрез използване на MATLAB, Годишник на ТУ-София, том 70, кн. 4, 2020, стр. 49-58, ISSN 1311-0829, doi: 10.47978/TUS.2020.70.04.026
17.	Ts. Slavov, A. Mitov, J. Kraleв, Il. Angelov. Comparison of Multivariable Control Algorithms for Load-sensing Electro-hydraulic Servo System. Proceedings of Technical University of Sofia, vol. 71 (2), 2021, p. 7-13, ISSN: 2738-8549, doi: 10.47978/TUS.2021.71.02.008
18.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов Сравнителен анализ на робастната устойчивост на линейно-квадратичен и H_{∞} регулатор за електрохидравлична кормилна система. Сборник доклади от Национална научна конференция “75 години съюз на учените в България – в полза на науката и образованието”, МДУ “Фредерик Жолио-Кюри”, к.к. “Св. св. Константин и Елена”, Варна, 2019, стр. 222-228, ISBN 978-954-397-045-2
19.	Ал. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Вграден робастен μ -регулатор в електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи, Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2019”, Созопол, 2019, стр. 299-309, ISSN 1314-5371.
20.	A. Mitov, Ts. Slavov, J. Kraleв, Il. Angelov. Investigation of robust stability of electro-hydraulic control module for hydraulic steering system with linear-quadratic regulator. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2018”, Русе, 2018, том 57, ISSN

	1311-3321
21.	Ал. Митов, Ц. Славов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. ∞ регулатор на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи. Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2018”, Созопол, 2018, стр. 327-335, ISSN 1314-5371
22.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Стенд за изследване на електрохидравлична система за кормилна уредба с чувствителност по натоварване. Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2018”, Созопол, 2018, стр. 319-326, ISSN 1314-5371
23.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Моделиране в среда на Simulink на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства. Сборник доклади от научна конференция на “ЕМФ-2017”, Созопол, 2017, стр. 77-86, том 2, ISSN 1314-5371
24.	А. Митов, Ил. Ангелов, Й. Кралев. Проучване и анализ на съществуващи схемни решения на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства. Топлотехника, 2018, стр. 24-29, ISSN 1314-2550
25.	A. Mitov, J. Kralov, Il. Angelov. Digital cascade pressure and position regulator for electrohydraulic steering system. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2016”, Русе, 2016, стр. 183-189, ISSN 1311-3321
26.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Синтез и оптимална настройка на цифрови ПИ-регулатори по експериментални честотни характеристики за електрохидравлична кормилна система. Сборник доклади от научна конференция на “ЕМФ-2016”, Созопол, 2016, стр. 93-100, том 2, ISSN 1314-5371
27.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Оптимална настройка на цифрови ПИ-регулатори по линеаризирани модели за кормилна електрохидравлична задвижваща система. Топлотехника, 2016, стр. 30-35, ISSN 1314-2550.

28.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Хидравлична задвижваща система с включен дискретен ПИД регулатор и импулсна модулация. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2014”, Русе, 2014, том 53, стр. 213-219, ISSN 1311-3321
29.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Идентификация на хидравлична задвижваща система с цифрово управление на изпълнителното устройство. Топлотехника, 2014, кн. 3, стр. 53-58, ISSN 1314-2550.
30.	K. Filipova, V. Yankov, F. Filipov, Y. Kraleв, T. Dimitrov. Investigating opportunities for hardware realization of transfer functions. Proceedings of International Scientific Conference “Computer Science”, 2011, Ohrid/Macedonia
31.	Ил. Angelov, A. Mitov, J. Kraleв. Approach for the identification of hydraulic drive systems with digital control actuator. Journal of Food Packaging Science, Technique and Technologies, 2014, vol. 4, p. 30-35, ISSN 1314-7420
32.	A. Mitov, J. Kraleв, Ил. Angelov. Digital Control of Electrohydraulic Steering Test Bench, Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies, 2015, vol. 7, p. 68-73, ISSN 1314-7773

Date: 22.06.2026

Signature:

/J. Kraleв/

Assit. Prof. Ph.D. Jordan Konstantinov Kraleв
Competition for academic position „Associate Professor” in: 5.2 Electrical Engineering, Electronics and Automation (Automatic Control Theory) at the Faculty of Automation, Department of Systems and Control, Technical University of Sofia, announced in issue 30 of the State Gazette dated 27.03.2026

Summary of the works in Group V

Ten of the publications [V-1–V-10], published in specialized scientific journals, are considered equivalent to a monographic work and can be summarized within the field of

Identification and Control of Multivariable Systems with Uncertain Models

Control under conditions of uncertainty is a fundamental problem in modern control theory and practice. In article [V-1], a method is presented for identification with an uncertain model of the population density distribution in a one-dimensional bounded habitat. The model is based on a nonlinear reaction–diffusion partial differential equation from population dynamics theory. The nonlinear partial differential equation is approximated by a linear time-varying state-space representation of order 120 with one input and 100 outputs, where the input variable is the length of the habitat. A binary random sequence is applied as an excitation signal, simulating expansion or contraction of the habitat. From the collected data sample, 100 Box–Jenkins (BJ) models are identified, describing the response of the population density at different points of the habitat, achieving 80% fit with respect to the validation dataset. These BJ models are combined into a single uncertain linear model by averaging their frequency responses, with a nominal model of order 12 and input multiplicative uncertainty approximated by minimum-phase filters. As a contribution, the article proposes an approach for representing, for control design purposes, infinite-dimensional systems described by partial differential equations via linear models with uncertainty obtained through system identification methods. This facilitates the design of robust controllers for biological, epidemiological, or chemical processes.

In article [V-2], a robust μ -controller (similar to H_∞ with D–K iterations) is developed for a position-tracking hydraulic drive with indirect control, implemented via a bridge configuration of fast-switching two-position microvalves. This represents a low-cost alternative to classical proportional hydraulic drives; however, high-frequency switching induces flow oscillations of the working fluid, which limits positioning accuracy in steady-state conditions. Based on a nonlinear model of the hydraulic system, a model with input multiplicative uncertainty is identified using an 8th-order Box–Jenkins structure, where the uncertainty bounds are determined through a

transformation of the parameter covariance matrix. To define the closed-loop performance requirements for μ -synthesis, a mixed-sensitivity framework is used with weighting filters for the tracking error and control signal. These filters are tuned to minimize low-frequency error while constraining the control amplitude within admissible limits, achieving a μ value of 0.974. The synthesized 28th-order controller is decomposed into a state observer and state feedback, enabling an anti-windup modification by explicitly incorporating the amplitude-limited control signal into the internal structure of the μ -controller. This reduces overshoot under step reference inputs. The controller is implemented on a 32-bit industrial controller and experimentally validated on a laboratory electro-hydraulic steering test bench. As a contribution, the article demonstrates a complete pipeline from identification with uncertain models to robust control of nonlinear systems, with emphasis on industrial applications such as hydraulic servo systems. The theoretical contributions include Theorem 1, which establishes the relationship between the identified probabilistic model and models with signal- or parameter-based uncertainty representations. Theorem 2, via L2-analysis of the Riccati equations arising in μ -synthesis, derives a condition for anti-windup modification of a standard μ -controller that reduces the influence of control saturation on the integral component, improving performance without compromising robustness.

Article [V-9] addresses the design and optimal tuning of a multivariable PID controller for a load-sensing electrohydraulic system, using an electrohydraulic proportional control module similar to the one designed in [V-2]. In the control of the steering system described in [V-9], the controller parameters are not set manually but are optimized using a genetic algorithm, for which classical initial tuning methods such as Ziegler–Nichols are not directly applicable. The study employs an identified discrete stochastic state-space model of the system, obtained from experimental data. The synthesized PID controller has three inputs and one output, incorporating position error, the signal for the position of the proportional valve, and a conditional feedback loop for anti-windup. The optimization aims at minimizing a quadratic performance index. Experimental results show that the optimally tuned PID controller provides a fast

aperiodic transient response, small steady-state error, and good agreement between simulation and physical experiment, with the system responding even faster under real conditions than predicted by the simulation model.

The model of the electrohydraulic steering system used in the controller synthesis in [V-9] was obtained using the identification methods described in [V-10], where the main result is the derivation of a linear discrete state-space model with one input and two outputs—namely, the position of the proportional valve plunger and the position of the piston of the working servo cylinder. The identification was carried out on a laboratory test bench, with excitation implemented by generating a random binary sequence as the input signal. The parameters of the state-space model were estimated using the prediction error method, and the model order was selected based on analysis of the Hankel singular values and validation via the residual correlation function.

In article [V-3], a laboratory model of a humanoid robot with 17 degrees of freedom is described, consisting of three subsystems: mechanical, actuation, and information-control. In article [V-4], an algorithm for coordination with 13 sequential stages is developed, ensuring forward motion without falling by transferring the projection of the center of mass onto the support polygon of the feet. The algorithm is implemented on an 8-bit microcontroller with automatic C code generation, and experimental studies have been conducted. Using identification methods, a model of the robot in state-space form is obtained, with 10 inputs (reference signals for the servo motors driving the legs) and 6 outputs (angular velocities of the feet). The identified state-space model is of 24th order, with a low prediction error and validated using an independent dataset. For stabilization during walking, a multivariable H_∞ controller is synthesized by solving linear matrix inequalities for the extended robot model, including weighting filters for the error and control signals. An upper bound of H_∞ norm of 2.45 is achieved for the closed-loop system, with disturbance attenuation down to -60 dB at low frequencies. As a contribution to the habilitation work, the article proposes an identification-based approach for deriving models of walking mobile robots, instead of the classical solution of inverse mechanics problems or analytical inverted pendulum

models, enabling robust control of humanoid robots. Additionally, in [V-8], a linear-quadratic regulator (LQR) is considered for stabilizing the humanoid robot during walking, where the weighting matrices Q and R are determined experimentally to achieve a desired trade-off between stabilization quality and control signal amplitude constraints. A Kalman filter is synthesized for state estimation. A hardware-in-the-loop simulation of the control algorithm is performed on an Arduino Mega 2560. Increased oscillations and settling time are observed due to communication delays, but overall there is a good level of agreement with the simulation results.

The article [V-5] develops a multivariable model for robust control of a two-wheeled robot, where the control objective is to stabilize the robot in an upright vertical position by moving the wheels. The developed laboratory prototype exhibits dynamic uncertainties arising from the elasticity of the mechanical structure, measurement inaccuracies from micromechanical inertial sensors, and the low resolution of the wheel position encoder. The main emphasis is that, instead of identification using classical single-variable models, a multivariable identification approach is employed for a model with one input and two outputs—wheel angular velocity and body tilt—which enables a more complete description of the dynamics and uncertainty. A 15th-order μ -controller is implemented, synthesized on the discrete model with a sampling rate of 200 Hz and augmented with integral feedback of the trajectory tracking error. An important part of the paper is the comparison with an LQG controller for the same robot from previous studies. It is shown that the μ -controller provides a wider closed-loop bandwidth, faster tracking error response, and a higher robustness margin, while the LQG controller demonstrates better suppression of noise in the control input. Hardware implementation experiments confirm that the computation time remains well below the sampling period, and the robot's behavior is non-oscillatory, with small tracking errors and bounded control signals. From a control theory perspective, the contribution lies in identifying a fifth-order discrete-time state-space model and subsequently transforming it into a model with output multiplicative uncertainty for each of the two outputs. The uncertainty is represented by third-order frequency-shaping filters. This work

demonstrates how the structure of uncertainty can be extracted from identification and then directly used in robust synthesis. It also highlights the advantage of models specifically designed for controller synthesis over models derived from fundamental physical laws.

The article [V-6] develops a robust μ -controller for the automatic regulation of glucose concentration in type 1 diabetes, based on the nonlinear pharmacokinetic Hovorka model. The main objective in model identification for control purposes is to determine a model with uncertainty that simultaneously accounts for variability in physiological parameters across individuals, as well as the transport delay between plasma and subcutaneous measurements of insulin and glucose concentrations, since these effects are critical for the performance of automated subcutaneous insulin delivery systems. The physiological process is represented by an uncertain linear model with a single scalar uncertainty, which is then transformed into $M-\Delta$ form for μ -synthesis. A key contribution is the formulation of the mixed-sensitivity synthesis problem through the selection of weighting filters for the tracking error and the control input, so as to balance closed-loop response time, attenuation of long-term disturbances, and limitation of the control signal. The synthesized controller is obtained by applying (D,G)-K iterations, which reduce conservatism in the presence of real parametric uncertainties. An analysis of controller order reduction using Hankel singular values is also performed. The controller order is successfully reduced from 24 to 10 without significant loss of performance. In terms of results, the paper demonstrates successful operation of the controller on both the linearized and nonlinear models, as well as on the UVa/Padova simulator for 10 adult subjects, including scenarios with unannounced meals. The average glucose concentrations remain within the target range, with predominant time spent in zones A and B. The reduced-order controller preserves robust stability.

A generalization of the presented engineering philosophy for controlling complex dynamic systems under uncertainty is given in [V-7]. The identification of linear models with uncertainty is considered, along with their subsequent use in robust controller synthesis, with an emphasis on their practical applicability to embedded control systems.

The main idea is that when the analytical description of the process is incomplete or unknown, the control model should be derived from experimental data through identification, and the uncertainty should be formulated in a way that is compatible with robust control theory. Particular attention is paid to the fact that parametric uncertainty with a large number of scalar parameters is often impractical for synthesis; therefore, unstructured multiplicative uncertainty is preferred, obtained via frequency-domain estimates of the maximum relative deviations from the nominal model. In the identification of uncertain linear models, one should seek structures that are sufficiently compact for μ -synthesis, yet sufficiently rich to capture the actual variations of the system. The importance of controller order reduction is also emphasized, as the order tends to grow rapidly due to the high order of the uncertain models, the order of the weighting filters, and the order required to approximate the D-part in the synthesis.

Theoretical Contributions:

1. A general approach has been developed for the identification of complex dynamical systems using models with uncertainty for the purpose of synthesizing robust control systems. The equivalence between representing a family of models via a probability density distribution, via frequency-dependent interval uncertainty, or via signal uncertainty has been theoretically proven.

2. A modification to the structure of the H_∞ controller obtained through μ -synthesis and with the inclusion of integral action has been proposed. This modification explicitly incorporates an amplitude constraint on the control signal in order to reduce the effect of integrator saturation under actuator amplitude limitations. The conditions under which the norm of the control generated by the modified controller is bounded by the norm of the unmodified controller have been theoretically derived.

3. A methodology has been justified for representing infinite-dimensional systems described by partial differential equations through compact linear models with

uncertainty. These models are derived from experimental data using system identification methods and are equivalent to representations using linear time-varying models.

Theoretical and applied contributions:

1. A methodology has been developed for designing robust controllers for systems with uncertain models, in which the uncertainty is derived directly from the identification process and incorporated into the synthesis procedure.

2. Robust μ -controllers have been developed and experimentally validated for hydraulic, mechatronic, and biotechnical systems, demonstrating the effectiveness of the approach under real-world conditions.

3. An identification approach for a humanoid robot has been proposed, where the dynamic model for stabilization and control purposes is obtained experimentally rather than through the classical solution of the inverse kinematics problem.

4. It has been shown how multivariable and uncertain models can be used to design stabilization strategies for two-wheeled or legged robots with varying structures and degrees of freedom.

Applied contributions:

1. Functional robust control systems have been implemented in both industrial and laboratory environments, including electrohydraulic, two-wheeled, and humanoid platforms.

2. Digital controllers have been deployed on microcontrollers, industrial controllers, and FPGA platforms, demonstrating the real-time applicability of the developed algorithms.

3. Experimental setups and test configurations have been constructed to evaluate stability, control performance, and system behavior under external disturbances.

4. Practical solutions for automated motion control in robots have been implemented, including walking coordination and balance stabilization.

No	Bibliography
1.	<p>J. Kralev. Uncertain Linear Stationary Model of Population Density in a Bounded Habitat, <i>IEEE Transactions on Control of Network Systems</i>, vol. 8(2), 2021, IF: 5, Q1</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85107178068</p>
2.	<p>J. Kralev, A. Mitov, Ts. Slavov. Robust μ-Controller for Hydraulic Spool Valve, Pilot Operated with Switching Micro Valves, <i>Energies MDPI</i>, 2021, vol. 14, 4817, IF: 3.2, Q1</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85112309133</p>
3.	<p>S. Sherif, J. Kralev, Ts. Slavov. Design of the H_∞ regulator for the stabilization of humanoid robot during walking, <i>AIP Conference Proceedings</i>, 2449, 02004, 2022,</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85138065660</p>
4.	<p>S. Sherif, J. Kralev, Ts. Slavov, V. Kunchev. Embedded Walking Algorithm for Biped Humanoid Robot with 17 Degrees-of-Freedom, <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i>, vol. 618, 2019, 012004</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85076083182</p>
5.	<p>Ts. Slavov, J. Kralev, P. Petkov, Multi-Output Identification and Robust Control of Two-Wheeled Robot, <i>Proceedings of 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)</i>, 2023, Rome, Italy</p>

	https://www.scopus.com/pages/publications/85177448717
6.	J. Krlev, Ts. Slavov, Robust μ -Controller for Automatic Glucose Regulation for Type I Diabetes Mellitus, <i>Mathematics MDPI</i> , 2023, vol. 11, 3856, IF: 2.2, Q1 https://www.scopus.com/pages/publications/85176421499
7.	P. Pektov, T. Slavov, J. Krlev. Embedded robust control of multivariable plants, IFAC-PapersOnLine, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.436 https://www.scopus.com/pages/publications/85080938774
8.	S. Sherif, T. Slavov, J. Krlev. Hardware-in-the-loop simulation on linear-quadratic controller for stabilization of a humanoid robot during walking, Proceedings of 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460279 https://www.scopus.com/pages/publications/85114204519
9.	A. Mitov, T. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov. GA-tuning of Multivariable PID Controller for Electrohydraulic Load-Sensing Servo System, E3S Web of Conferences, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132704001 https://www.scopus.com/pages/publications/85133969010
10.	A. Mitov, T. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov. Identification of electro-hydraulic load-sensing servo system. Engineering for Rural Development, 2021, doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF356 https://www.scopus.com/pages/publications/85112862681

Summary of the works in Group G7 and G8

1. Implementation of Control Systems in Programmable Platforms

The article [G8-1] presents a technique for GPU-in-the-loop simulation of linear controllers in Simulink, using the Microsoft Accelerated Massive Parallelism (AMP) library for parallel execution of state-space models. It addresses CPU limitations in processing large matrices in control systems by proposing an S-function (GPUStateSpace) that is activated during C code generation in Simulink. The block enables SIMD parallelization of computations when simulating discrete systems implemented in state space. In the example, a controller and an observer are synthesized based on desired pole placement. The simulation compares CPU and GPU implementations of identical closed-loop systems. The main contribution is a new Simulink block for GPGPU acceleration of linear time-invariant models, applicable in complex dynamic simulations without degrading closed-loop performance. Similarly, [G8-30] examines a parallel implementation of a physically realizable transfer function on an FPGA device, where discretization is performed and a fixed-point representation of real numbers is selected. VHDL code is generated from the Simulink model of the discrete implementation of the transfer function, and simulation studies are conducted in the Xilinx simulator to verify the accuracy of the approximations. Article [G7-1] proposes a method for implementing floating-point arithmetic on FPGA using Simulink models and automatic VHDL code generation. Two architectures are described for addition/subtraction and multiplication of single-precision numbers according to the IEEE 754 standard, where real numbers are represented by sign, exponent, and mantissa, each processed using basic Simulink blocks. The models are tested in Simulink and deployed on a Spartan-3 FPGA platform, where they operate with minimal latency—within a single clock cycle—due to an implementation that relies primarily on combinational logic without flip-flops.

A number of works demonstrate the implementation of complex control laws on various programmable platforms. In [G8-2], the stages for designing robust embedded systems using MATLAB and Simulink are described, focusing on the modeling and synthesis of LQG, LQ, H^∞ , and μ controllers, followed by automatic C code generation for embedding in a microcontroller. The study emphasizes the stages involved in implementing complex control laws, starting from mathematical models, progressing to Simulink diagrams, SIL/HIL simulations, and deployment on platforms such as DSPs or FPGAs.

A large portion of the experiments were carried out using a 32-bit digital signal processor from the TI C28x family. An approach was employed for automatic generation of control C code from a Simulink model of the controller. The resulting code is integrated with the software configuration consisting of basic control modules for the respective hardware platform. In [G8-3], a digital controller is embedded for the control of an analog model. In [G8-4], a control system for a two-wheeled robot is implemented using a linear-quadratic regulator and an H^∞ filter. In [G8-9], a linear-quadratic regulator and an H^∞ controller are embedded in a 32-bit STM32F407 microcontroller; instead of code generation, these control algorithms are implemented directly as C programs.

In [G8-5], a digital signal processor is used as a component of a hardware-in-the-loop simulation system. In this setup, a PID controller for a cart-pendulum system is implemented on the digital processor, while the plant is simulated in Simulink. A real-time communication system is established between the digital signal processor and the simulation model. The objective of the hardware-in-the-loop simulation is to verify the consistency between the hardware implementation of the controller and its underlying mathematical model. Elements of hardware-in-the-loop simulation in the control of a perfusion pump are also reported in [G8-6].

In addition to digital signal processors, synthesized complex control laws can also be embedded in standard industrial programmable logic controllers (PLCs). In [G8-7], a linear quadratic regulator was implemented in a specialized industrial controller for

controlling slow-moving mobile machines, using an approach for automatic generation of ST code from the Simulink model of the regulator. In [G8-13], an H_∞ regulator was implemented for the same laboratory setup, with code generated from the Simulink model and embedded as an FB (function block) component in the Danfoss development environment. Similarly, in [G8-19], a μ -regulator was embedded using a comparable approach. In [G8-25], a cascade control system with position and pressure loops was implemented using blocks from the standard library of the Plus1 integrated software development environment for Danfoss. To enable rapid prototyping of controllers in industrial controllers, [G8-13] presents a laboratory setup that integrates the capabilities of the industrial controller for accessing sensors and actuators of the platform with MATLAB/Simulink-based control and real-time CAN communication. In this setup, the control action is computed in real time within the Simulink environment and sent via CAN to the controller, which applies it to the corresponding physical output. Sensor measurements are also transmitted back to the Simulink model in real time.

In addition to high-performance processors for embedded systems, a number of works also employ low-cost 8-bit microcontrollers from the ATmega series, implemented on the Arduino platform. In [G8-8], a synthesized PI controller for soil temperature regulation in indoor plants is implemented as a real-time C program. In [G8-15], a real-time control system for a walking robot with 17 degrees of freedom is developed, where synchronization of the commands sent to the joint servo drives is achieved, and a system for real-time signal acquisition and logging is organized. In [G8-10], speed control of a brushless electric motor is implemented by connecting a three-phase MOSFET power converter to the Arduino platform. A real-time control software configuration is developed, utilizing the hardware counters of the ATmega to process pulses from the encoder as well as from Hall sensors. The signals from the Hall sensors directly generate software interrupts to perform the required commutation of the brushless motor phases. A discrete PI controller for motor speed control is implemented within a timer interrupt. Real-time communication with Simulink is also established for

signal monitoring and logging, as well as for modifying the form of the speed reference signal.

Theoretical and applied contributions:

1. A methodology has been developed for the implementation and study of control systems by utilizing Simulink's capabilities for generating real-time C code from the block diagram of the controller, which can be interfaced with an installed real-time operating system or the underlying software environment of the respective programmable platform.

2. An approach for GPU-in-the-loop simulation of linear controllers and discretely implemented state-space systems is proposed, demonstrating effective transfer of computational load to a SIMD-type parallel architecture and enabling evaluation of control performance in real time.

3. The feasibility of hardware implementation of control algorithms on FPGA is investigated through modeling in Simulink and generation of VHDL code, linking the theoretical synthesis of linear controllers with their digital realization in a parallel computing architecture.

4. An architecture is proposed for single-cycle execution of basic floating-point arithmetic operations—addition, subtraction, multiplication, and division—implemented entirely using combinational logic and embedded within an FPGA device.

Applied contributions:

1. Multiple real-time control systems have been implemented and experimentally validated by embedding automatically generated control code for the controller model into various hardware platforms—digital signal processors, industrial controllers, and 8-bit microcontrollers.

2. Implementation and experimental validation of a linear discrete system represented in state space on a graphics processing unit (GPU).

3. Implementation and experimental validation of an arithmetic logic unit (ALU) for floating-point operations on an FPGA.

4. Implementation and experimental validation of a hardware-in-the-loop simulation system using a digital signal processor with real-time USB serial communication, as well as a hardware simulation system using an industrial controller for mobile hydraulics with real-time CAN communication.

5. Deployment of automatically generated Structured Text (ST) code into an industrial controller for mobile hydraulics.

6. A real-time control system for a brushless electric motor with Hall sensors, implemented with hard real-time constraints on an 8-bit microcontroller, integrating commutation control, a PI speed controller, and maintenance of a real-time serial communication channel.

2. Design and Application of LQR, H_∞ , μ and Conventional PID Controllers

The article [G8-4] presents a model-based approach for controlling a two-wheeled robot using a linear–quadratic regulator for vertical stabilization, in which a 17th-order H_∞ filter is used for state estimation. In [G8-7], a linear–quadratic regulator with a Kalman filter for state estimation based on an identified model is synthesized for controlling an electrohydraulic steering system. In [G8-9], linear–quadratic and H_∞ controllers are synthesized for fluid level control in a tank, and a comparison between the two controllers is performed. In [G8-11], a linear–quadratic regulator is synthesized for controlling glucose concentration in type 1 diabetes using the Hovorka model, assuming subcutaneous glucose measurement and subcutaneous insulin infusion. In [G8-14], a linear–quadratic regulator for controlling an electrohydraulic steering system is investigated under different levels of load disturbance, implemented as pressure disturbances in the working chambers of the servo cylinder.

The article [G8-3] examines identification and robust control of multivariable systems through modeling uncertainty based on experimental data and H_∞ controller

synthesis. In [G8-13], an H^∞ controller is also implemented, designed on a multivariable state-space model obtained via identification. Compared to similar solutions, the system uses additional feedback from an LVDT sensor measuring the position of the proportional valve, which improves the dynamics and control accuracy. Various operating modes are studied, confirming that the developed system tracks the prescribed flow commands. In [G8-12], the robust stability of an electrohydraulic steering system with an H^∞ controller is investigated, where multiplicative uncertainty is introduced into the multivariable model of the plant. In [G8-17], a comparison between a linear quadratic controller and an H^∞ controller for a load-sensing electrohydraulic steering system is performed, and in [G8-18], their robust stability is also compared on a model with uncertainty. In [G8-19], a robust μ -controller is synthesized for an electrohydraulic control module for digital control of hydraulic steering systems. The robust stability of the electrohydraulic control module with a linear quadratic controller is also studied in [G8-20], and with an H^∞ controller in [G8-21].

As is well known, most industrial control systems are implemented as systems based on PID control. Therefore, when implementing complex control laws, a comparison is usually sought with an analogous implementation that uses classical PID laws.

In [G8-5], an optimal tuning of the parameters of two PID controllers for controlling the cart–pendulum system is performed using a genetic optimization algorithm, which ensures robust stability under model uncertainties. Optimal tuning of a digital PID controller for an electrohydraulic proportional valve with indirect control via two-position valves is carried out in [G8-23] using a gradient-based approach. A robust PI controller synthesis is also presented in [G8-8] for soil temperature control in combination with the endpoint theorem. In [G8-6], the pressure of a perfusion pump is regulated using PID control under conditions of variable viscosity and nonlinear hydrodynamic effects. In [G8-10], a PI control law is applied for speed control of a brushless electric motor. In [G8-25], a cascade control system with PI controllers for pressure and position is designed for an electrohydraulic steering system. Additionally,

[G8-26] presents the synthesis of a PI controller using a gradient optimization algorithm for an electrohydraulic steering system based on experimentally obtained third- and sixth-order frequency-domain models. The influence of the model on PI controller tuning for electrohydraulic steering systems is investigated in [G8-27], including both simulation and experimental comparisons. In [G8-28], a simulation study of a hydraulic drive system with PID control and two-position valves is conducted under varying actuator cylinder loads, with analysis of the self-oscillatory mode. The control system of steering units based on OSPE 200 with a PI controller is also presented in [G8-32].

Theoretical and applied contributions:

1. Synthesis of a linear–quadratic regulator with an H^∞ filter for vertical stabilization of a two-wheeled robot, based on a high-order uncertain model derived using system identification methods.

2. Synthesis of a linear–quadratic regulator with a Kalman filter, an H^∞ controller, and a μ -controller for position control of an electrohydraulic steering system and for position control of an electrohydraulic actuation module, based on models obtained via system identification methods.

3. Synthesis of linear–quadratic and H^∞ controllers for fluid level control in a tank.

4. Synthesis of a linear–quadratic regulator with a Kalman filter for glucose concentration control in type 1 diabetes.

3. Modeling and Identification of Control Systems

In model-based controller synthesis, the structure and properties of the mathematical model used are of particular importance. As is well known, the main approaches for obtaining models are either through the use of first principles from the natural sciences or through identification methods based on experimental data. Furthermore, in control system synthesis, the goal is usually to derive specialized models for control purposes that explicitly capture the functional dependence between control

inputs and measurable outputs. In this context, it is necessary not only to model the nominal system but also to estimate the bounds of the unmodeled dynamics, so that the closed-loop system achieves robust stability and robust performance.

In [G8-3], the derivation of models with uncertainty for multivariable systems is considered using system identification methods, where the model uncertainty is obtained as an approximation of the confidence interval of the system's frequency characteristics derived during identification. The proposed methodology is applied to an analog simulation system. In [G8-8], an uncertain model is obtained by generating a set of transient responses at different measurement points and performing their parametric approximation. In [G8-7], identification with multivariable state-space models of an electrohydraulic steering system is carried out using random input excitations. A similar approach is applied in [G8-9], where a nonlinear static characteristic of the actuator (pump) is added to the obtained linear model.

In [G8-4], a nonlinear uncertain model of the cart–pendulum system with one input and two outputs is derived, followed by the derivation of an uncertain linearized model via analytical linearization. Article [G8-15] presents two complementary approaches for modeling a laboratory model of a humanoid robot with 17 degrees of freedom—a full geometric-physical model in Simulink/Simscape Multibody and a model obtained through identification based on experimental data. A laboratory prototype of the robot with 17 degrees of freedom has also been constructed. An analytical modeling approach is also used in [G8-6] for a hydrodynamic system with a perfusion pump and nanofiltration of biological fluids. The modeling is carried out in the Simulink environment using SimHydraulics blocks. In [G8-11], the analytical nonlinear pharmacokinetic Hovorka model is linearized around a selected operating point to obtain a state-space linearized model. In [G7-2], [G8-23], and [G8-24], an analytical model of an electrohydraulic control module with four two-position, two-way directional valves for driving a servo cylinder is derived, which is also implemented using Simulink blocks.

In [G8-10], the identification of a brushless DC motor is described in the frequency domain by applying sinusoidal inputs (0.01–1 Hz) and estimating the gain and

phase delay to obtain a nonparametric amplitude–phase frequency characteristic. This characteristic is then approximated by a low-order parametric model. A similar approach is applied in [G8-26] to obtain nonparametric and parametric models of a digitally controlled electrohydraulic drive system.

Applied and theoretical contributions:

1. Derivation of models with uncertainty for multidimensional systems using system identification methods and interval representation of frequency response variations, resulting in models of a cart–pendulum system, an analog modeling system, an electrohydraulic steering system, an electrohydraulic control module, and a humanoid robot.

2. Derivation, numerical implementation, and experimental validation of analytical system models using principles of physical modeling, resulting in models of a perfusion pump with nanofiltration, an electrohydraulic control module, and a pharmacokinetic model of glucose concentration in type 1 diabetes.

3. Derivation of nonparametric and parametric models in the frequency domain by studying the open-loop system response to input signals with varying frequency and amplitude, resulting in models of a brushless DC motor and an electrohydraulic steering system.

Publications in Group G7

No	Bibliography
1.	J. Krlev. Design of Floating-Point Arithmetic Unit for FPGA with Simulink. Proceedings of 18th International Conference on Smart Technologies (EUROCON), 2019, Novi Sad, Serbia, doi: 10.1109/EUROCON.2019.8861860 https://www.scopus.com/pages/publications/85074194817
2.	A. Mitov, J. Krlev, T. Slavov, Il. Angelov. Analytical Modelling of Hydraulic

<p>Proportional Spool Valve Pilot Operated with Switching Micro Valves. Proceedings of 6th International Symposium on Environmental-Friendly Energies and Applications (EFEA), 2021, doi: 10.1109/EFEA49713.2021.9406252</p> <p>https://www.scopus.com/pages/publications/85105337552</p>

Publications in Group G8

No	Bibliography
1.	J. Krlev. GPU-In-The-Loop Simulation of Linear Controllers, Information Technologies and Control, vol. 3, 2019, pp. 27-32, ISSN 2367-5357, doi: 10.7546/itc-2019-0014
2.	П. Петков, Ц. Славов, Й. Кралев. Проектиране на робастни вградени системи за управление с MATLAB и Simulink. Годишник на ТУ-София, том. 68, кн. 2, 2018, стр. 235-244, ISSN 1311-0829
3.	Ц. Славов, Й. Кралев, Н. Христов, П. Петков. Идентификация и робастно управление на многомерни обекти, Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 371-380, ISSN 1311-0829
4.	Ц. Славов, Й. Кралев, Н. Христов, П. Петков. Управление на двуколесен робот посредством линейно-квадратичен регулатор и H_{∞} филтър, Годишник на ТУ-София, том 66, кн. 2, 2016, стр. 275-284, ISSN 1311-0829
5.	Ц. Славов, Й. Кралев, П. Петков. Хардуерна симулация на ПИД регулатор за управление на система количка-махало, Годишник на ТУ-София, том 67, кн. 2, 2017, стр. 233-242, ISSN 1311-0829
6.	Й. Кралев, Б. Иванов, И. Иванов, А. Йончев, Д. Георгиева. Един подход за управление на перфузионна помпа при нанопилтрация. Годишник на ТУ-София, том 67, кн 2, 2017, стр. 279-288, ISSN 1311-0829

7.	A. Mitov, J. Kraley, Il. Angelov, Ts. Slavov. Identification and synthesis of linear-quadratic regulator for digital control of electrohydraulic steering system, 11 th International Fluid Power Conference (IFK), 2018, Aachen, Germany, ISBN 978-3-9816480-1.0
8.	В. Димитров, А. Козакова, Й. Кралев. Цифрово управление на температурата на почвата за стайни растения, Годишник на ТУ-София, том 67, кн. 2, 2017, стр. 243-252, ISSN 1311-0829
9.	В. Кънчев, Ц. Славов, Й. Кралев. Вградена система за управление на ниво на флуид в резервоар. Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр.8 289-298, ISSN 1311-0829
10.	Й. Кралев, Ш. Шериф. Вградена система за управление на скоростта на безколекторен електродвигател чрез Arduino контролер. Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр. 255-262, ISSN 1311-0829
11.	Й. Кралев, Ш. Шериф, В. Кънчев, Ц. Славов. Линейно-квадратично управление на концентрацията на глюкоза при пациенти с диабет от първи тип. Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 297-305, ISSN 1311-0829
12.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Изследване робастната устойчивост на вграден H_{∞} регулатор за кормилна електрохидравлична задвижваща система, Годишник на ТУ-София, том 69, кн. 2, 2019, стр. 325-334, ISSN 133-0829
13.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Стенд за изследване на системи за управление на кормилна електрохидравлична задвижваща система, Годишник на ТУ-София, том 70, кн. 4, 2020, стр. 67-76, ISSN 1311-0829, doi: 10.47978/TUS.2020.70.04.028
14.	А. Митов, Ц. Славов, Й. Кралев, И. Ангелов. Линейно квадратично управление на електрохидравлична кормилна система, Годишник на ТУ-София, том 68, кн. 2, 2018, стр. 245-254, ISSN 1311-0829

15.	Sh. Sherif, J. Kralev, Ts. Slavov. Modeling of a Humanoid Biped Robot through Different Approaches. Information Technologies and Control, vol. 4, 2019, p. 40-58, ISSN 2367-5357, doi: 10.7546/itc-2019-0020
16.	Ш. Шериф, Й. Кралев, Ц. Славов. Откриване на обекти в изображение чрез използване на MATLAB, Годишник на ТУ-София, том 70, кн. 4, 2020, стр. 49-58, ISSN 1311-0829, doi: 10.47978/TUS.2020.70.04.026
17.	Ts. Slavov, A. Mitov, J. Kralev, Il. Angelov. Comparison of Multivariable Control Algorithms for Load-sensing Electro-hydraulic Servo System. Proceedings of Technical University of Sofia, vol. 71 (2), 2021, p. 7-13, ISSN: 2738-8549, doi: 10.47978/TUS.2021.71.02.008
18.	А. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов Сравнителен анализ на робастната устойчивост на линейно-квадратичен и H_∞ регулатор за електрохидравлична кормилна система. Сборник доклади от Национална научна конференция “75 години съюз на учените в България – в полза на науката и образованието”, МДУ “Фредерик Жолио-Кюри”, к.к. “Св. св. Константин и Елена”, Варна, 2019, стр. 222-228, ISBN 978-954-397-045-2
19.	Ал. Митов, Й. Кралев, Ц. Славов, И. Ангелов. Вграден робастен μ -регулатор в електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи, Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2019”, Созопол, 2019, стр. 299-309, ISSN 1314-5371.
20.	A. Mitov, Ts. Slavov, J. Kralev, Il. Angelov. Investigation of robust stability of electro-hydraulic control module for hydraulic steering system with linear-quadratic regulator. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2018”, Русе, 2018, том 57, ISSN 1311-3321
21.	Ал. Митов, Ц. Славов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. H_∞ регулатор на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични

	кормилни системи. Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2018”, Созопол, 2018, стр. 327-335, ISSN 1314-5371
22.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Стенд за изследване на електрохидравлична система за кормилна уредба с чувствителност по натоварване. Сборник доклади от научна конференция “ЕМФ-2018”, Созопол, 2018, стр. 319-326, ISSN 1314-5371
23.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Моделиране в среда на Simulink на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства. Сборник доклади от научна конференция на “ЕМФ-2017”, Созопол, 2017, стр. 77-86, том 2, ISSN 1314-5371
24.	А. Митов, Ил. Ангелов, Й. Кралев. Проучване и анализ на съществуващи схемни решения на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства. Топлотехника, 2018, стр. 24-29, ISSN 1314-2550
25.	A. Mitov, J. Kraly, Il. Angelov. Digital cascade pressure and position regulator for electrohydraulic steering system. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2016”, Русе, 2016, стр. 183-189, ISSN 1311-3321
26.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Синтез и оптимална настройка на цифрови ПИИ-регулатори по експериментални честотни характеристики за електрохидравлична кормилна система. Сборник доклади от научна конференция на “ЕМФ-2016”, Созопол, 2016, стр. 93-100, том 2, ISSN 1314-5371
27.	А. Митов, Й. Кралев, Ил. Ангелов. Оптимална настройка на цифрови ПИИ-регулатори по линеаризирани модели за кормилна електрохидравлична задвижваща система. Топлотехника, 2016, стр. 30-35, ISSN 1314-2550.
28.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Хидравлична задвижваща система с включен дискретен ПИД регулатор и импулсна модулация. Научни трудове от МНК “РУ и СУ 2014”, Русе, 2014, том 53, стр. 213-219, ISSN 1311-3321

29.	Ил. Ангелов, А. Митов, Й. Кралев. Идентификация на хидравлична задвижваща система с цифрово управление на изпълнителното устройство. Топлотехника, 2014, кн. 3, стр. 53-58, ISSN 1314-2550.
30.	K. Filipova, V. Yankov, F. Filipov, Y. Kraleв, T. Dimitrov. Investigating opportunities for hardware realization of transfer functions. Proceedings of International Scientific Conference “Computer Science”, 2011, Ohrid/Macedonia
31.	Il. Angelov, A. Mitov, J. Kraleв. Approach for the identification of hydraulic drive systems with digital control actuator. Journal of Food Packaging Science, Technique and Technologies, 2014, vol. 4, p. 30-35, ISSN 1314-7420
32.	A. Mitov, J. Kraleв, Il. Angelov. Digital Control of Electrohydraulic Steering Test Bench, Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies, 2015, vol. 7, p. 68-73, ISSN 1314-7773

Date: 22.06.2026

Signature:

/J. Kraleв/