

РЕЗЮМЕТА
НА НАУЧНИТЕ ТРУДОВЕ НА
ГЛ. АС. Д-Р ИНЖ. АЛЕКСАНДЪР СТОЯНОВ МИТОВ
ЗА УЧАСТИЕ В КОНКУРС ЗА ЗАЕМАНЕ НА АКАДЕМИЧНА
ДЛЪЖНОСТ „ДОЦЕНТ“ В ПРОФЕСИОНАЛНО НАПРАВЛЕНИЕ
5.1. „МАШИННО ИНЖЕНЕРСТВО“ ПО НАУЧНА СПЕЦИАЛНОСТ
„ХИДРАВЛИЧНИ И ПНЕВМАТИЧНИ ЗАДВИЖВАЩИ СИСТЕМИ“,
ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ,
КАТЕДРА „ХИДРОАЕРОДИНАМИКА И ХИДРАВЛИЧНИ МАШИНИ“,
ПУБЛИКУВАН В ДВ: БР. 100 ОТ 24.11.2020.

Представените трудове включват 49 научни публикации извън тези по дисертационния труд и 1 учебник в съавторство.

Създадена е лабораторна база за изследване електрохидравлични задвижващи системи за кормилни уредби на мобилни машини. Голяма част от публикациите отразяват работата на кандидата по 9 научно-изследователски договора (2 под негово ръководство) и разработването на различни лабораторни стендове и установки, които са внедрени в учебния процес.

Изследователската дейност има научно–приложен и приложен характер. Тя обхваща областите на *анализ, синтез и експериментално изследване на електрохидравлични системи за задвижване и управление, симулационно изследване на електрохидравлични устройства и системи за задвижване с цифрово управление, моделиране и идентификация на електрохидравлични задвижващи системи, разработка на класически и сложни алгоритми за управление чрез програмируеми платформи, проектиране и реализация на лабораторни стендове за експериментално изследване на електрохидравлични кормилни уредби с възможност за оценка на работоспособността и качествата на различни вградени системи за тяхното управление.*

При реализацията на системите за управление са използвани различни типове изчислителни устройства като персонални компютри, програмируеми логически контролери и цифрови сигнални контролери. Експерименталните изследвания са извършени с помощта на специализирана измервателна апаратура даваща възможност за обработка и визуализация на сигнали в реално време за различни хидравлични, механични и електрически величини.

В този аспект, резюметата на научните трудове са систематизирани съгласно представените авторски справки по показатели за изпълнение:

I. Показател В4: Хабилитационен труд – научни публикации (не по-малко от 10) в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (В4-1÷В4-11).

Единадесет от публикациите **[В4-1÷В4-11]**, публикувани в специализирани научни издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (SCOPUS и/или WoS), са включени като равностойни на монографичен труд и могат да се обобщят в направлението:

„Синтез и реализация на вградени системи за управление на електрохидравлични кормилни уредби за нискоскоростни мобилни машини“.

В съвременните мобилни машини нуждата от пропорционално електрическо управление на кормилната уредба е следствие от необходимостта за дистанционно управление, посредством GPS. Освен това осъществяването на механично управление

с променливо предавателно отношение от волана към управляемата ос на машината е често търсена функция за подобряването на производителността и комфорта на водача. В този аспект, нараства и нуждата от разработване на електрохидравлични управляващи модули (ЕХУМ) служещи за непряко цифрово управление на хидравличните кормилни устройства (ХКУ), намиращи приложение в кормилните системи за бавноходови (нискоскоростни) мобилни машини с максимална скорост на движение до 60 km/h.

При автоматизацията на редица индустриални приложения се прилагат пропорционално-интегрални-диференциални (ПИД) закони за управление и разработването на каскадни системи на база на тях. Първоначално е извършен синтез на различни ПИ регулатори получени чрез различни по структура модели синтезирани по експериментални данни, измерени във вид на времеви и честотни характеристики. Настройката на разновидностите на ПИ регулатора е извършена чрез итеративни оптимизационни процедури, в основата на които е методът на нелинейните най-малки квадрати (non-linear least squares) и при изпълнение на конкретни изисквания за качество на управление. Този подход за управление е представен в трудове [B4-1, B4-2, B4-5, B4-11].

При електрохидравличните задвижващи системи на кормилните уредби за мобилни машини се налага използването на обратни връзки по различни параметри, което е следствие не само от нуждата от прецизно позициониране, но и поради наличието на съпротивителни сили действащи върху управляемите колела, които сили действат като смущения при завой. При такива многомерни системи настройката на вградени регулатори се затруднява от наличието на кръстосани връзки между каналите. Следователно при многомерни обекти са по-целесъобразни закони за управление изведени от критерии за оптималност върху предавателната матрица на обекта за управление [B4-4, B4-8, B4-9, B4-10].

В допълнение на това, за случая на дистанционно управление посредством контролер, поведението на машината зависи силно от вградения програмно управляващ алгоритъм, респ. регулатор. Качеството на управление за този случай, може да се подобри при извеждане на по-точен модел на обекта. При математическото моделиране винаги се налага компромис между сложността (определена от реда на динамичните съставки) на използвания модел и точността на апроксимация. В сложните модели трудно се откриват важните за управлението математически свойства, а по-точните модели позволяват достигане до по-високи показатели за качество на управление. Обикновено сложните модели са подходящи при анализ на динамиката на системата, но са неудобни при проектирането на регулатори.

За да се определи математичен модел на електрохидравлична кормилна система най-често се използват два подхода – *физическо моделиране или идентификация*. Физическото моделиране изисква задълбочено познаване на конструкцията на обекта и съответните физически параметри (характеристики дебит-налягане, хидравлични съпротивления, затворени обеми, геометрия на управляващите ръбове на плунжерите и др.). Поради липсата на достатъчна априорна информация се изучава числен модел получен чрез процедура за идентификация по експериментални данни, показана подробно в трудове [B4-3, B4-6, Г8-23]. Друга причина за този подход е възможността да се изведе модел на шума, който може да се използва за проектиране на оптимален филтър на *Калман*. Целта на идентификацията е да достигне до линейен модел тип „черна кутия“, който достатъчно добре описва динамиката на електрохидравличната кормилна уредба и въздействащите смущаващи въздействия за целия работен диапазон. За да се получи този модел са проведени експерименти с обекта в отворен контур. Тактът на дискретизация е избран достатъчно малък. За да се осигури необходимото възбуждане към обекта е използван случаен сигнал от типа псевдо-случайна двоична последователност (random binary signal, RBS) – получен като бял *Гаусов* шум преминал през релеен елемент.

На база на получените от идентификацията модели, в пространство на състоянията, са синтезирани многомерни регулатори - линейно-квадратичен *Гаусов* (LQG) регулатор,

H_∞ регулатор и μ -регулатор. Тяхното проектиране, синтез и реализация са представени в трудове [B4-4, B4-8, B4-9, B4-10].

При проектирането на LQG регулатор, базиран на идентификационен модел, от съществено значение е оценката на състоянието, тъй като променливите на състоянието не са измерими и представляват сложна комбинация от физически променливи на обекта. Проектиран е алгоритъм за наблюдател използван за оценка на състоянието. Динамиката на наблюдателя обаче влияе върху динамиката на затворената система и трябва да бъде внимателно настроена. Алгоритъмът на филтъра на *Калман* е често срещан оценител на състоянието, който настройва динамиката на наблюдателя като въвежда прецизен баланс между сигналната неопределеност на модела и измеримия шум. Необходимо е обаче да се познава модела на шума. В допълнение на това, друго предимство на моделите за идентификация на системи са техните статистически характеристики, което позволява определяне на споменатите параметри, необходими за синтеза на филтъра на *Калман*.

Крайната цел на вградената електроника в хидравличните устройства е подобряването на експлоатационните характеристики, безопасността и възможностите за диагностика (ISO 13849-1). Тъй като хидравличните елементи и устройства за задвижване се проектират по отношение на максимално ефективното използване на енергията, то техните конструктивни изпълнения се характеризират с нелинейност при моделирането им. Неопределеността причинена от тези елементи може да наруши устойчивостта и качеството на затворената система за управление. Вградените алгоритми трябва да бъдат внимателно изследвани по отношение на неопределеността преди тяхното вграждане в реалната машина. Поради тази причина са проведени изследвания за робастната устойчивост и робастното качество в трудове [B4-8, B4-9, B4-10].

За тази цел в модела е въведена входна мултипликативна неопределеност, отчитаща немоделираните динамични ефекти, дължащи се на нелинейности в електрохидравличните кормилни устройства. Системата е представена като $M - \Delta$ структура даваща възможност да се изчисли структурираното сингулярно число (μ) на затворената система за управление, което число е минимизирано чрез $D - K$ итеративен алгоритъм, осигуряващ робастна устойчивост и робастното качество на цялата електрохидравлична задвижваща система.

Всички резултати получени по време на синтеза на разработените в симулационни условия (представени чрез времеви и честотни характеристики) регулатори, са потвърдени експериментално в посочените трудове въз основа на създадената лабораторна база за изследване на ЕХКУ, представена в трудове [B4-1, B4-2, B4-7].

Научни трудове по показател B4:

B4-1. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Design of digital PI regulators from experimental frequency response of electrohydraulic steering system*, 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-1-5090-6690-2, pp.400÷405, Sofia, 2017, DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955472.

Резюме: Представена е оптималната настройка на два цифрови пропорционално-интегрални (ПИ) регулатора за електрохидравлична кормилна уредба (ЕХКУ) предназначена за нискоскоростни мобилни машини. Регулаторите са синтезирани чрез експериментално получени честотни характеристики на кормилната уредба. Честотните характеристики са апроксимирани чрез две рационални предавателни функции. Настройката на параметрите на двата ПИ регулатора е извършена чрез итеративна оптимизационна процедура в среда на MATLAB®/Simulink®. Регулаторите са вградени в специализиран промишлен контролер за мобилни приложения. Извършено е сравнение за качеството на управление на двата регулатора чрез реален експеримент върху лабораторен стенд за изследване на електрохидравлични кормилни уредби.

B4-2. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Investigation of model-based tuning of PI regulator for electrohydraulic steering system*, The 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), ISBN 978-153863434-9, pp.318÷323, Munich, Germany, 2017, DOI: 10.1109/ICUMT.2017.8255165.

Резюме: В статията е представена оптималната настройка на осем ПИ регулатора с различни настройки на техните параметри, синтезирани чрез моделно-ориентиран подход. Параметрите на регулаторите са определени чрез процедура за числена оптимизация въз основа на изведени различни симулационни модели на база на експериментално получени времеви и честотни характеристики на обекта за управление. Регулаторите са програмирани в контролер за мобилните приложения и техните резултати са сравнени експериментално при управление на позицията на буталото на кормилен серво цилиндър. Резултатите показват, че параметрите силно зависят от избора на математичен модел, описващ динамиката на ЕХКУ. Въпреки различната математическа структура на модела, физическите експерименти с различните регулатори показват подобни качества анализирани чрез съответни показатели.

B4-3. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Embedded Electrohydraulic Controller with Digital Valve Actuation for Steering of Heavy Duty Machines*, The 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO'2018, ISBN 978-153865682-2, Budva, Montenegro, 2018, DOI: 10.1109/MECO.2018.8406011.

Резюме: Изследвана е вградена система за управление за ЕХКУ предназначена за тежки мобилни машини. Целта на работата е да бъдат оценени качествата на два цифрови ПИ регулатора за следене на позицията на буталото на кормилен серво цилиндър в ЕХКУ. Регулаторите са оптимално настроени въз основа на два алтернативни нелинейни модела получени чрез процедура за идентификация по експериментални данни - физически модел (РА) и нелинеен авторегресионен модел (NARX). Аналитичният модел е тип „сива кутия“ модел, при който определената структура е фиксирана, а стойностите на параметрите са неизвестни. Нелинейният ARX модел е модел тип „черна кутия“, който описва само входно-изходното функционално поведение на системата.

B4-4. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov, *H-infinity Control of an Electrohydraulic Power Steering System*, 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP - 2018, ISBN 978-1-5386-4695-3, pp.690÷693, Athens, Greece, 2018, DOI: 10.1109/TSP.2018.8441398.

Резюме: Разработен е оптимален алгоритъм за следене на задание за позиция предназначен за ЕХКУ, който се основава на идентификация на многомерен модел от трети ред в пространство на състоянията и H_{∞} регулатор. Експерименталните изследвания са извършени на лабораторна установка, която се състои от: електрохидравличен управляващ модул, хидравлично кормилно устройство (ХКУ), кормилен серво цилиндър, 32-битов контролер и електронен джойстик. Разработен е софтуер за вграждане на проектирания H_{∞} регулатор в контролера на лабораторната установка. Стандартният подход прилаган при следене на задание в такива системи обикновено се основава на класически ПИД закон за управление. За разлика от него, в тази статия следенето се извършва чрез използване на многомерен регулатор за управление, който отчита сложния характер на процесите. По този начин е постигната по-висока ефективност на затворената система за управление.

B4-5. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Cascade control algorithm of test bench for studying load-sensing electrohydraulic steering systems*, International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, BulTrans-2018, Proceedings Matec Web of Conference, ISSN 2261-236X, **SJR:0.166**, 2018, DOI: 10.1051/mateconf/201823402006.

Резюме: Статията представя проектиране и синтез на три-контурна каскадна система за управление с вградени ПИ регулатори предназначена за лабораторен стенд за изследване на ЕХКУ с чувствителност към изменение на външното натоварване ("Load-sensing") върху изпълнителния хидродвигател. Представени са структурата и реализацията, както на хидравличната задвижваща система, така и на системата за управление. Каскадната система се състои от три регулатора за измерими величини: позиция на плунжера в пропорционалния хидравличен разпределител, скорост и позиция на буталото на серво цилиндъра. Разработеният алгоритъм за управление е вграден в 32-битов контролер за мобилни приложения, а за тази цел е разработен подходящ софтуер. Проведени са експериментални изследвания, които потвърждават качеството на затворената система за управление при тестването ѝ с различни според начина на формиране задания – от електронен джойстик и от предварително програмирано задание в контролера. Оборудването на нов стенд с регулируема аксиално-бутална помпа с регулатор по налягане тип "DR", както и включването на съвременни технически средства за измерване дават възможност за визуализация и обработка на сигнали за редици механични и хидравлични величини в реално време. Това от своя страна допринася за изследването на енергийната ефективност на системата при включването на различни хидромеханични регулатори на помпата.

B4-6. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *SIMO System Identification of Transfer Function Model for Electrohydraulic Power Steering*, 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-172811413-2, pp. 130÷135, Sofia, 2019, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771571.

Резюме: Представена е подробно процедурата за идентификация на ЕХКУ с цел получаване на предавателна функция на модел. Оценен е модел с един вход и три изхода (SIMO) на база на експериментално измерени данни от лабораторен стенд, на който е разработена електрохидравличната задвижваща система. Изходните променливи са позиция на плунжера в пропорционалния хидравличен разпределител, дебит захранващ серво цилиндъра и позиция на буталото на серво цилиндъра измерени чрез идентификационен експеримент извършен в отворен контур. Полученият от идентификацията многомерен авторегресионен модел (ARX) е валидиран чрез тест за независимост на остатъчната грешка и след това е редуциран до трети ред. Моделът представен в пространство на състоянията служи за по-нататъшна работа за синтез на многомерни регулатори за електрохидравлични кормилни системи.

B4-7. Mitov, Al., *Implementation of Embedded Three-Loop Control Algorithm for Electrohydraulic Power Steering System*, 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-172811413-2, pp.136÷141, Sofia, 2019, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771478.

Резюме: Представени са проектиране, синтез и реализация на три-контурна система за управление предназначена за ЕХКУ на съвременни нискоскоростни мобилни машини. Разработената система е вградена в 32-битов промишлен контролер за мобилни приложения. Разработен е софтуер за вграждане представляващ структура от функционални блокове, генерираща изпълним машинен код, както и последващото въвеждане и стартиране върху платформата. Подробно е представена процедурата по вграждане на база на средата за програмиране PLUS+1 Guide (Danfoss) подходяща за използвания контролер. Проведено е изследване на шума генериран от сензорите използваните в експерименталните изследвания, както и анализ на тяхната точност.

B4-8. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Robust Stability of Electro-Hydraulic Power Steering System with H-infinity Controller*, The 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO'2019, ISBN 978-172811739-3, Budva, Montenegro, 2019, DOI: 10.1109/MECO.2019.8760060.

Резюме: Изследвана е робастната устойчивост на вграден робастен регулатор в кормилна електрохидравлична задвижваща система предназначен за оптимално следене на позиция от кормилен серво цилиндър. Регулаторът е получен чрез H_∞ синтез извършен на база на идентификация на многомерен модел в пространство на състоянията. Във връзка с изследването на робастната устойчивост в модела е въведена параметрична неопределеност. Системата е представена като $M - \Delta$ структура, което позволява изчисляването на структурираното сингулярно число (μ) на затворената система с H_∞ регулатор. Настоящата работа доказва, че затворената система запазва своята устойчивост при наличието на входна мултипликативна неопределеност дължаща се на наличието на нелинейности в електрохидравличните кормилни устройства предназначени за нискоскоростни мобилни машини. Ефективността на синтезирания H_∞ регулатор е потвърдена експериментално на лабораторен стенд.

B4-9. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov, *Comparison of Robust Stability for Electrohydraulic Steering Control System Based on LQG and H-infinity Controller*, 42st International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP 2019, ISBN 978-1-5386-4695-3, pp. 712÷715, Budapest, Hungary, 2019, DOI: 10.1109/TSP.2019.8769034.

Резюме: Извършен е сравнителен анализ на робастната устойчивост на два вградени регулатора предназначени за електрохидравличните кормилни системи на нискоскоростни мобилни машини - линейно-квадратичен Гаусов (LQG) регулатор и H_∞ регулатор. Двата регулатора са синтезирани на база на линеен модел в пространство на състоянията получен чрез процедура за идентификация по експериментални данни. За изследване на робастната устойчивост на затворената система за управление е въведена 30% неопределеност в матрицата B на модела, която описва съществуващата зона на нечувствителност в следящия хидравличен разпределител. Затворената система е представена като $M - \Delta$ структура, чрез която е изчислено структурираното сингулярно число (μ) за двата регулатора. Въведената неопределеност отчита отклоненията на параметрите, характеризиращи въздействието на управляващия сигнал върху състоянията на модела. Проектираните регулатори са реализирани в 32-битов контролер. За тази цел е разработен специализиран софтуер за работа в реално време. Извършени са редица експерименти, които потвърждават качеството на електрохидравличната система. Представените експериментални резултати потвърждават, че системата за управление постига предписаните показатели за качество на управление.

B4-10. Krlev, J., Al. Mitov, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Robust Mu-Controller for Electrohydraulic Steering System*, 18th International Conference on Smart Technologies - EUROCON 2019, ISBN 978-153869301-8, pp.1-÷6, Novi Sad, Serbia, 2019, DOI: 10.1109/EUROCON.2019.8861982.

Резюме: Извършени са проектиране и реализация на вграден робастен μ -регулатор в електрохидравличен управляващ модул (ЕХУМ) за цифрово управление на хидравлични кормилни системи. Експерименталните изследвания са извършени на лабораторен стенд за изследване на електрохидравлични кормилни системи за нискоскоростни мобилни машини. Регулаторът е синтезиран на база на линеен многомерен модел в пространство на състоянията получен чрез процедура за идентификация по експериментални данни. В модела е въведена входна мултипликативна неопределеност, отчитаща немоделираните динамични ефекти, дължащи се на нелинейности в кормилната система. Системата е представена като $M - \Delta$ структура даваща възможност да се изчисли структурираното сингулярно число (μ) на

затворената система за управление, което е минимизирано чрез $D - K$ итеративен алгоритъм осигуряващ робастна устойчивост и робастно качество на цялата електрохидравлична задвижваща система.

B4-11. Krlev, J., **Al. Mitov**, Ts. Slavov, Il. Angelov. *Optimal three-loop cascade PI-P-PI controller for electro-hydraulic power steering system*, International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, BulTrans-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 664, Sozopol, Bulgaria, ISSN 1757-8981, pp.1÷11, **SJR:0.198**, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/664/1/012011.

Резюме: Представен е оптимално настроен ПИД регулатор, който изчислява параметрите на управляващия сигнал за превключване на клапаните в ЕХУМ. Проектираният каскаден алгоритъм за управление се състои от три ПИД регулатора. Представени са етапите на синтеза на каскадния алгоритъм за управление. Целта на алгоритъма за управление е да се постигнат високо бързодействие в преходните процеси, без пререгулиране и минимална грешка в установен режим. Трите регулатора са каскадно свързани, така че изходът на един регулатор е входен сигнал за следващия. Няколко изходни променливи на обекта са използвани при изчисляване на управляващия сигнал, определящ коефициента на запълване на ШИМ сигнала, управляващ превключващите клапани. Първият изходен сигнал е положението на плунжера в пропорционалния хидравличен разпределител, измерен с линеен индуктивен измервателен преобразувател (LVDT). Вторият изход е консумираният дебит на системата, измерен със специализиран зъбен дебитомер. Последният изход е положението на буталото на серво цилиндъра. Регулаторите са настроени чрез оптимизационна процедура използваща метода на нелинейните най-малки квадрати. Извършен е сравнителен анализ на резултатите преди и след оптималната настройка на системата за управление.

II. Показател Г7: Научни публикации в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (Г7-1÷Г7-5).

Високата степен на автоматизация при използването на електронно управление в голяма част от промишлените и мобилни приложения се осъществява чрез пропорционални електрохидравлични управляващи устройства, при които регулираният елемент се премества пропорционално на изменението на управляващия електрически сигнал. Това дава възможност за промяна на основните енергийни параметри в системата – *налягане и дебит* и реализация на адаптивно пропорционално електрическо управление. Фокусът на това изследване е поставен върху пиезоелектрическите задвижващи механизми, използвани като електромеханични преобразуватели, подходящи за задвижване и управление на хидравлични разпределителни устройства с високо бързодействие имащи относително малка зона на нечувствителност. В труд **[Г7-1]** е извършен подробен анализ на различни съществуващи конструкции, въз основа на които е разработен на концептуален модел. Разработен е тримерен виртуален прототип, който е използван за изследване на различни параметри в симулационни условия. На база на тези изследвания е разработена конструкция на хидравличен разпределител с пропорционално електрическо управление от пиезоелектричен преобразувател.

При автоматизацията на много процеси в промишлеността, транспорта и авиацията широко се използват хидравличните и електрохидравличните следящи системи. Управляващата част на тези системи се състои от механични или електронни устройства, които възприемат задаващото въздействие от чувствителните елементи, или от изчислителните устройства, сравняват ги със сигналите на обратната връзка и формират сигнали за управление на силовата част, състояща се от регулиращи устройства и изпълнителни хидродвигатели.

Електрохидравличните сервосистеми могат да бъдат проектирани за управление на различни физични величини като позиция, сила, налягане, скорост, ускорение и др. Когато са необходими високо бързодействие и точност за задвижване и управление на системи с относително големи маси, върху които действат големи съпротивителни сили, най-често приложението на електрохидравличните следящи системи се явява оптимален вариант за решаването на задачата за задвижване, регулиране и управление.

В труд [Г7-2] е разработено схемно решение на електрохидравлична следяща позиционна система, извършен е синтез на основните параметри и е направена компоновка на системата във вид на лабораторен стенд. В основата на разработения стенд е аксиално-бутална регулируема помпа оборудвана с регулатор по дебит и налягане (тип "DFR", *Rexroth® Bosch Group*), който е реализиран алтернативно, на база на пропорционален хидравличен разпределител с висока собствена честота. Лабораторният стенд дава възможност за експериментални изследвания с различни изпълнителни органи – хидравличен серво цилиндър или ротационен хидродвигател. Затворената система за управление е реализирана с обратни връзки по скорост и натоварване на изпълнителните хидродвигатели. Включването на алтернативен регулатор с пропорционално електрическо управление (система тип "SYDFE", *Rexroth® Bosch Group*) дава възможност за експериментални изследвания не само при промяна на хидравличните параметри, но и на параметрите на вградената система за управление. Такива изследвания са проведени в трудовете [Г7-3, Г7-4], които сравняват в условия на числена симулация и на реален експеримент, два линейно-квадратични Гаусови регулатори (LQG) с филтър на Калман за електрохидравлична сервосистема. Фокусът в [Г7-3] е върху представената усъвършенствана версия на LQG регулатор. Разработена е първоначална версия [Г8-23] на вградената система за управление с този вид регулатор, която съдържа обратни връзки по разлика в наляганията в двете работни камери на серво цилиндъра и по позицията на неговото бутало. Поради ниската чувствителност на LQG регулатора към изходния канал по налягане, в тази работа е разработен регулатор с допълнителни обратни връзки по позиция на плунжера (LVDT) на пропорционален разпределител с непряко електрохидравлично управление (интегриран в електрохидравличен управляващ блок) и по дебит захранващ блока. Въвеждането на обратна връзка по позиция на регулиращия елемент в следящия разпределител позволява по-прецизно отработване на задания за позиция на буталото на изпълнителния серво цилиндър. Другата допълнителна обратна връзка по дебит, захранващ електрохидравличния управляващ блок, дава възможност за анализ на енергийната ефективност на цялата електрохидравлична система. Също така, за да се осигури достатъчно добро следене на задание, е проектиран LQG регулатор с интегрално действие [Г7-3, Г7-4].

От друга страна достатъчно добро следене на задание за позиция може да бъде постигнато чрез моделно-предсказващ регулатор (MPC) предназначен за електрохидравлична сервосистема, който е проектиран и изследван в труд [Г7-5]. Вграден в електрохидравлична система за управление MPC има някои предимства пред конвенционалните закони за управление, които се изразяват във възможността за преодоляване на ограниченията в зоната на нечувствителност на пропорционалния хидравличен разпределител. Това е често срещан проблем, тъй като тази зона е следствие от положителното припокриване, наложено от стандартите (ISO 13849-1, EU Machinery Directive) за сигурност, изключващи възможността за самозавиване към тези системи. Основната цел на MPC е да сведе до минимум критерия за ефективност по отношение на ограниченията на системните входове и системни изходи. Приложен към системите за управление, MPC алгоритъмът оптимизира бъдещата стойност на управляващия сигнал, като минимизира интеграл от грешката между задаващия сигнал и прогнозирания изход, и квадрата на управляващия сигнал на системата във всеки такт на дискретизация. Недостатък на алгоритъма е необходимостта от използването на голям изчислителен ресурс.

Научни трудове по показател Г7:

Г7-1. Angelov, Il., K. Kamberov, **Al. Mitov**, Ts. Ivanov, *Implementation of piezoelectric actuators for pilot valve of high response hydraulic servo valve*, 4th EAI International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures - Fabulous 2019, Sofia, Bulgaria, *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (ICST)*, ISBN 978-3-030-23975-6, **SJR:0151**, pp.318÷326, Springer-Switzerland, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-23976-3_28.

Резюме: Високата степен на автоматизация при използването на електронно управление в голяма част от промишлените и мобилни приложения се осъществява чрез пропорционални електрохидравлични управляващи устройства, при които регулиращият елемент се премества пропорционално на изменението на управляващия електрически сигнал. Това дава възможност за промяна на основните енергийни параметри – налягане и дебит, както и за реализация на адаптивно пропорционално електрическо управление. Фокусът на това изследване е върху пиезоелектричните задвижващи механизми, използвани като електромеханични преобразуватели, подходящи за задвижване и управление на хидравлични разпределители с високо бързодействие (high response servo valve) имащи относително малка зона на нечувствителност. Извършен е подробен анализ на различни съществуващи конструкции, въз основа на които е разработен концептуален модел. Разработен е виртуален прототип, който е използван за изследване на различни параметри в симулационни условия. На база на тези изследвания е разработена конструкция на хидравличен разпределител с пропорционално електрическо управление от пиезоелектричен преобразувател.

Г7-2. Angelov, Il., N. Stanchev, **Al. Mitov**, *Experimental Study of Electronically Controlled Closed-Loop Electrohydraulic System with Variable Displacement Pump*, 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-1-5090-6690-2, pp.541÷545, Sofia, 2019, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771489.

Резюме: Разработено е схемно решение на електрохидравлична следяща позиционна система, извършен е синтез на основните параметри и е направена компоновка на системата във вид на лабораторен стенд. В основата на разработения стенд е аксиално-бутална регулируема помпа оборудвана с регулатор по дебит и налягане (тип DFR), реализиран на база на пропорционален хидравличен разпределител с относително висока собствена честота. Лабораторният стенд дава възможност за експериментални изследвания с различни изпълнителни органи – хидравличен цилиндър или ротационен хидродвигател. Затворената система за управление е реализирани с обратни връзки по скорост и натоварване на изпълнителните хидродвигатели (SYDFE). Включването на регулатор с пропорционално електрическо управление дава възможност за експериментални изследвания не само при промяна на хидравличните параметри, но и на параметрите на вградената система за управление.

Г7-3. **Mitov, Al.**, J. Kraleв, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Reference Tracking LQG Control of Electrohydraulic Servo System for Mobile Machines*, 10th IEEE International Conference on Intelligent Systems (IS'2020), ISBN 978-172815456-5, pp.475÷480, Varna, Bulgaria, 2020, DOI:10.1109/IS48319.2020.9200178.

Резюме: Основната цел на статията е да представи усъвършенствана версия на линейно-квадратичен Гаусов регулатор с филтър на Калман за електрохидравлична серво система предназначена за съвременни мобилни машини. Въвеждането на обратна връзка по позиция на регулиращия елемент в следящия разпределител позволява по-прецизно отработване на задания за позиция на буталото на изпълнителния серво цилиндър. Другата допълнителна обратна връзка по дебит,

захранващ електрохидравличния управляващ блок, дава възможност за анализ на енергийната ефективност на цялата електрохидравлична система. За да се осигури достатъчно добро следене на задание, е проектиран LQG регулатор с интегрално действие.

Г7-4. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Real-Time LQG Control Strategies for Electrohydraulic Steering of Mobile Machines*, 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, (SIELA 2020), ISBN 978-172814346-0, pp.294-297, Bourgas, Bulgaria, 2020, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167047.

Резюме: Основната цел на статията е да се сравнят два подхода за управление в реално време на електрохидравлична сервосистема за съвременни мобилни машини с два различни линейно-квадратични Гаусови (LQG) регулатора. И двете модификации на LQG регулатора са проектирани на базата на два многомерни модела на неопределеност на един същ обект. Моделите на обекта са получени чрез процедура за идентификация чрез подход тип „черна кутия“ и отчитат отклоненията на параметрите, характеризиращи начина, по който управляващият сигнал въздейства върху състоянието на моделите. Разликата между двете модификации на вградените регулатори се изразява в различните видове изходни сигнали, които се използват като обратна връзка в системата за управление. Извършен е сравнителен анализ на свойствата на регулаторите във времевата и в честотната област. Получените резултати показват по-добрите следящи свойства на едната система. Алгоритмите за управление са реализирани в 32-битов контролер. Изпълнени са редица експерименти, които потвърждават качеството на електрохидравличната система за задвижване и управление чрез определяне на конкретни показатели.

Г7-5. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Model Predictive Control Design for Electro-hydraulic Power Steering Application*, The 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO'2020), ISBN 978-172816947-7, pp.658-661, Budva, Montenegro, 2020, DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134222.

Резюме: Основната цел на тази статия е да представи проектирането и изпълнението на моделно-предсказващ регулатор (MPC) предназначен за електрохидравлична сервосистема за тежки мобилни машини. Вграден в електрохидравлична система за управление MPC има някои предимства пред конвенционалните закони за управление, които се изразяват във възможността за преодоляване на ограниченията в зоната на нечувствителност на пропорционалния хидравличен разпределител. Това е често срещан в практиката проблем, тъй като тази зона е следствие от положителното припокриване, наложено от стандартите за сигурност към тези системи. Основната цел на MPC е да сведе до минимум критерия за ефективност по отношение на ограниченията на системните входове и системните изходи. Приложен към системите за управление, MPC алгоритъмът оптимизира бъдещата стойност на управляващия сигнал, като минимизира грешката между сигнала от заданието и прогнозирания изход на системата във всеки такт на дискретизация.

III. Показател Г8: Научни публикации в нереферирани списания с научно рецензиране или в редактирани колективни трудове (Г8-1÷Г8-33).

III.1. Изследване на динамични процеси и приложение на дигитално управление в хидравлични задвижващи системи.

Г8-1. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Анализ на динамичните характеристики на налягането в система с бързопревключващ разпределител с дигитално управление*, Национална конференция с международно участие „Машинни науки 2012“, Сливен, сп. Топлотехника, ISSN 1314-2550, книга 1, стр.32÷37, 2012.

Резюме: В работата се изследват динамичните процеси на изменение на налягането в относително дълъг тръбопровод с малко сечение, при използването на бързопревключващ трипътен двупозиционен (3/2) хидравличен разпределител с дигитално управление, свързан на входа на тръбопровода. Основна цел поставена от авторите е да се усъвършенства съществуващ математичен модел, с оглед на по-добро съвпадение с резултатите от реалния експеримент. Резултатите от реалния и числения експеримент се припокриват като отклоненията са по-малки от 0.5%.

Г8-2. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Изследване влиянието на хидравличен акумулатор върху динамичните характеристики на налягането в система с бързо превключващ разпределител с дигитално управление*, Научна конференция с международно участие “ЕМФ – 2012”, Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, т.2, стр.138÷145, 2012.

Резюме: В статията е представен симулационен модел подходящ за теоретичното изследване на динамичното изменение на налягането в прав тръбопровод свързан към трипътен двупозиционен бързо превключващ разпределител с дигитално управление. Въз основа на този модел е направен анализ на влиянието на хидравличен акумулатор върху динамичното изменение на налягането в експерименталния тръбопровод. В оптималния вариант при 3 МПа, характеристиката се подобрява в зоната на ниските налягания, като това показва, че включването на хидравличен акумулатор при определени настройки на неговия обем и налягане дава възможност да се подобри преходния процес. Това е особено важно в системите с дигитално управление, в които включването на хидравличен акумулатор служи за филтър на динамичните пулсации на налягането.

Г8-3. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Изследване влиянието на подпорен клапан върху динамичните характеристики на налягането в система с бързо превключващ разпределител с дигитално управление*, Научна конференция с международно участие “ЕМФ – 2012”, Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, т.2, стр.146÷151, 2012.

Резюме: Представен е синтез на симулационен модел подходящ за теоретичното изследване на динамичното изменение на налягането в прав тръбопровод с предвключен трипътен двупозиционен бързо превключващ разпределител с дигитално управление. На база на този модел е направен анализ на влиянието на подпорен клапан върху динамичното изменение на налягането в експерименталния тръбопровод. С оглед минимизирането на енергийните загуби в системите с дигитално управление и запазване видът и формата на характеристиката на налягането се препоръчва включването на подпорен клапан, който е настроен в интервала от 0.1÷0.5 МПа.

Г8-4. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Изследване влиянието на едновременно включени хидравличен акумулатор и подпорен клапан върху динамичните характеристики на налягането в система с бързо превключващ разпределител с дигитално управление*, Научна конференция “РУ и СУ`2012”, Русе, Научни трудове, ISSN 1311-3321, т.51, с.1.2., стр.120÷125, 2012.

Резюме: В работата се изследват динамичните процеси на изменение на налягането възникващи в относително дълъг тръбопровод с малко сечение при използването на бързо превключващ трипътен двупозиционен (3/2) хидравличен разпределител с дигитално управление на входа му. Основна цел поставена от авторите е да се анализира влиянието на едновременно включени хидравличен акумулатор и подпорен клапан върху изменението на налягането в динамичен режим. Изследваната комбинация на включени в системата хидравличен акумулатор и подпорен клапан при конструктивни и настройочни параметри показва, че е възможно да се постигне съответствие между вида и формата на входния (по управление) и изходния

(по налягане) сигнали, което от своя страна ще доведе до високи нива на ефективност на регулирането, както в разглежданата хидравлична задвижваща система с дигитално управление, така и в други хидравлични задвижващи системи реализирани с този начин на управление.

Г8-5. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Изследване влиянието на амплитудата на входния управляващ сигнал върху вида на динамичните характеристики на налягането в система с бързо превключващ разпределител с дигитално управление, хидравличен акумулатор и подпорен клапан*, Научна конференция "ПУ и СУ`2012", Русе, Научни трудове, ISSN 1311-3321, т.51, с.1.2., стр.126÷131, 2012.

Резюме: В статията се изследват динамичните процеси на изменение на налягането възникващи в хидравлична система включваща тръбопровод свързан с 3/2 хидравличен разпределител с дигитално управление, хидравличен акумулатор и подпорен клапан. Основна цел е да се изследва и анализира влиянието на големината на амплитудата на входния управляващ сигнал върху изходящия сигнал по налягане в експерименталната система.

Г8-6. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Изследване изменението на налягането в два симетрични паралелни тръбопровода с предвключен разпределител с дигитално управление*, Международна научна конференция "Унитех`2012", Габрово, ISSN 1313-230X, Сборник доклади, т.2, стр.281÷286, 2012.

Резюме: В работата се изследват динамичните процеси на изменение на налягането възникващи в хидравлична система състояща се от два тръбопровода свързани към 3/2 хидравличен разпределител с дигитално управление, хидравличен акумулатор и подпорен клапан. Основна цел е да се изследва и анализира влиянието на дължините на двата експериментални тръбопровода върху динамичните характеристики на налягането в експерименталната система.

Г8-7. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Изследване на динамични процеси в хидравлична система с цифрово управление на изпълнителното устройство*, Национална конференция с международно участие „Сливен` 2013“, Сливен, сп. Топлотехника, ISSN 1314-2550, книга 2, стр.60÷64, 2013.

Резюме: Изследвана е хидравлична система състояща се от два паралелно захранвани 3/2 хидравлични разпределителя, всеки от които е свързан с прав тръбопровод. На изхода си тръбопроводите захранват изпълнително устройство, а между всеки разпределител и тръбопровод са включени последователно дросел с постоянно сечение, и хидравличен акумулатор. Представени са резултати показващи реакцията на изпълнителното устройство във вид на преходен процес, вследствие на синтез на симулационен модел. Изследванията са насочени към анализ на влиянието на честотата на входния управляващ цифров сигнал върху реакцията на хидравличното изпълнително устройство в динамичен режим.

Г8-8. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Оценка качеството на регулиране при изследване на преходни процеси на изпълнително устройство в хидравлична система с цифрово управление*, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2013", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, т.2, стр.101÷108, 2013.

Резюме: В статията е изследвана хидравлична задвижваща система състояща се от два паралелно захранвани 3/2 хидравлични разпределителя изхода, на които е свързан към тръбопровод. На изхода си тръбопроводите са свързани към изпълнителен цилиндър, а между всеки разпределител и тръбопровод са включени дросели с постоянно сечение и хидравличен акумулатор. Представени преходните процеси от реакцията на изпълнителното, получени след синтез на симулационен

модел. Изследванията са насочени към оценка и анализ на качеството на регулиране при различни стойности на хода на изпълнителното устройство.

Г8-9. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Определяне коефициента на усилване при изследване на преходни процеси на изпълнително устройство в хидравлична система с цифрово управление*, Научна конференция "ПУ и СУ'2013", Русе, Научни трудове, ISSN 1311-3321, т.52, с.1.2., стр.74÷78, 2013.

Резюме: В настоящата работа е представена методика за определяне коефициента на усилване, абсолютната и относителна грешка в позиционирането, според която показателите се оценяват от преходния процес. Изследваните преходни характеристики представляват реакция на изпълнително устройство при различни честоти на входния управляващ цифров сигнал и с различни стойности на неговия ход. Характеристиките са получени вследствие на синтез на математичен симулационен модел на изследвана експериментална уредба, основаваща се на управление на изпълнително хидравлично устройство чрез два или повече паралелно захранвани трипътни, двупозиционни хидравлични разпределители, които захранват изпълнително устройство.

Г8-10. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Хидравлична задвижваща система за тръбоогъваща машина*, Международна научна конференция "Унитех'2013", Габрово, ISSN 1313-230X, Сборник доклади т.3, стр.354÷359, 2013.

Резюме: Разгледаната в настоящата работа хидравлична машина за огъване на дебелостенни безшевни тръби е оборудвана с устройство за допълнително усилие, което да се поддържа постоянно по време на технологичния процес. Устройството се състои от хидравличен цилиндър с електрохидравлично управление по отношение на управляващите разпределителни устройства. Недостатъците на съществуващата система се състоят в ударни натоварвания в края на хода на огъващата маса и невъзможността за постигане на повторемост на точността на предварително зададените технологични параметри, касаещи зоната на огъване. Представено е реализирано подобрение на съществуващата хидравличната система, постигащо повторемост на точността на позициониране по време на технологичния процес на огъване, реализирано чрез вграждане на допълнителни хидравлични устройства. Извършен е енергиен анализ на системата.

Г8-11. Angelov, Il., **Al.Mitov**, *Research analysis of dynamic processes occurring in pipelines with digitally controlled hydraulic valve*, 9th International Fluid Power Conference, 9th IFK'2014, ISBN 978-3-9816480-1-0, pp.543÷553, RWTH Aachen, Germany, 2014.

Резюме: Изследвана е хидравлична задвижваща система състояща се от трипътен двупозиционен бързо превключващ хидравличен разпределител, на изхода на който е свързан относително дълъг тръбопровод с малко сечение. Представени са резултати показващи динамичното изменение на налягането и дебита в експерименталния тръбопровод, във вид на времеви характеристики, получени вследствие на синтез на симулационен модел. Въз основа на експериментални данни този модел е верифициран и усъвършенстван, с цел да бъдат извършени редица самостоятелни изследвания насочени към количествена оценка на влиянията, както на допълнително включени хидравлични устройства, така и на параметрите на входния управляващ сигнал върху преходните характеристики. Извършен е анализ обобщаващ тези изследвания, с цел да утвърдят и окачествят системите с дигитално управление като ефективно-приложими в управляващите вериги на относително малки, средни и големи по мощност хидравлични задвижвания.

Г8-12. Angelov, Il., **Al.Mitov**, *Analysis of transient processes of actuator device in a hydraulic system with digital control*, International Conference "Mechatronics`2014", ISBN 978-91-7063-564-9, p.141÷150, Karlstad, Sweden, 2014.

Резюме: Въз основа на получения работен експлоатационен диапазон на налягането в двата паралелни тръбопровода и в съответствие с изводите за управление по дебит, в системата е включено изпълнително устройство. Устройството представлява двойно-действащ равноплощен хидравличен цилиндър, който се захранва едностранно от двата паралелни контура. На изхода на устройството е свързан подпорен клапан. Извършено е усъвършенстване на симулационния модел, което дава възможност да се изследва реакцията на изпълнителното устройство с различни стойности на неговия ход при различни честоти на входния управляващ сигнал. На база на представените преходни процеси е извършена оценка на качеството на регулиране на изследваната хидравлична система с цифрово управление.

Г8-13. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, Й. Кралев, *Идентификация на хидравлична задвижваща система с цифрово управление на изпълнителното устройство*, Национална конференция с международно участие „Сливен`2014“, Сливен, сп. Топлотехника, ISSN 1314-2550, книга 3, стр.53÷58, 2014.

Резюме: В настоящата работа е показан структурно променен настройваем модел, който дава възможност за идентификация по преходен процес от реакция на изпълнително устройство чрез въвеждането на частична нелинейност във вътрешна обратна връзка. По този начин е оценен колебателно-затихващия характер на преходния процес на база на променлива едномерна функция. Основна цел е да се анализират преходните процеси от реакция на изследваното устройство, които са оценени като качество на регулиране и неговите показатели. Освен това извършването на идентификация на системата по преходни процеси служи като база за по-нататъшни изследвания имащи за цел да се определи предавателната функция на системата и честотните ѝ характеристики.

Г8-14. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, *Сравнителен анализ на резултатите получени от идентификацията на хидравлична задвижваща система с цифрово управление*, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2014", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, т.2, стр.110÷118, 2014.

Резюме: Настоящата статия е следствие от поетапно реализиран подход за идентификация на хидравлична задвижваща система с цифрово управление чрез числена апроксимация на динамични процеси. Динамичните процеси във вид на времеви характеристики са получени на база на известен от предходни изследвания нелинеен математичен симулационен модел на експериментална постановка. Представена е цялостния подход за идентификация. Извършен е сравнителен анализ между резултатите от идентификацията и тези получени от нелинейния математичен симулационен модел, от гледна точка на качество на регулиране на изследваната система.

Г8-15. Ангелов Ил., **Ал. Митов**, Й. Кралев, *Хидравлична задвижваща система с включен дискретен ПИД регулатор и импулсна модулация*, Научна конференция "РУ и СУ`2014", Русе, Научни трудове, ISSN 1311-3321, т.53, с.1.2., стр.213÷219, 2014.

Резюме: Вследствие на поредица от симулационни изследвания на експериментална постановка с изпълнително устройство задвижвано посредством два трипътни двупозиционни разпределителя захранвани в паралел, към всеки от които е свързан тръбопровод, в настоящата работа се разглежда експериментална постановка с включен ПИД регулатор и импулсна модулация с фиксирана честота. Основна цел на настоящата работа е да се покаже една възможност за управление на разглежданата в предходни работи хидравлична система при управление в затворен контур с дискретен

ПИД регулатор, като показва неговата структура и работоспособност. Анализът на работоспособността на регулатора е извършен въз основа на симулационни преходни характеристики от реакцията на изпълнителното устройство по време на следене на стъпаловидно задание.

Г8-16. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the dynamic pressure variation in hydraulic system with two parallel connected digital control valves*, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), Vol. 4. Issue 7, ISSN 2319 – 4847, pp.176-181, 2015.

Резюме: Изследвана е хидравличната задвижваща система, която се състои от два прави тръбопровода захранвани от два отделни 3/2 хидравлични бързо превключващи разпределителя. Между всеки разпределител и тръбопровод е свързан хидравличен дросел с постоянно сечение. Резултатите показват динамично изменение на налягането в тръбопроводите във вид на преходни характеристики получени на база на разработен симулационен модел. Изследванията имат за цел да анализират влиянието на дроселното сечение, както и на фазовото изместване в управляващия сигнал на разпределителите върху характеристиките на налягането в двата паралелни тръбопровода. Резултатите от настоящото изследване са използвани като основа за изграждането на цифрови хидравлични системи за задвижване и управление.

III.2. Изследване на електрохидравлични устройства и системи.

Г8-17. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Test Bench for Experimental Research and Identification of Electrohydraulic Steering Units*, 10th International Fluid Power Conference, 10th IFK'2016, ISBN 978-3-9816480-1-0, pp.225÷236, TU-Dresden, Germany, 2016.

Резюме: В работата са показани схемно решение, конструктивно изпълнение и компоновка на стенд за изследване на електрохидравлични кормилни управления тип OSPE 200. Реализацията на стенда е въз основа на извършения в предходна работа синтез на основните хидравлични и конструктивни параметри. Представени са схемата на свързване на компонентите изграждащи системата за цифрово управление, както и структурната схема на затворения контур. Показано е разработеното програмно осигуряване на системата при реализацията на различни видове регулатори. Въз основа на експериментално измерени преходните процеси е извършена идентификация чрез оценяване на различни модели. Представени са структурата и възможностите на моделите от идентификация, както и процедурите за тяхната валидация.

Г8-18. Митов, Ал., Й. Кралев, Ил. Ангелов, *Оптимална настройка на цифрови ПИ-регулатори по линеаризирани модели за кормилна електрохидравлична задвижваща система*, Национална конференция с международно участие „Сливен` 2016“, Сливен, сп. Топлотехника, ISSN 1314-2550, книга, стр.30÷35, 2016.

Резюме: Извършени са проектиране и синтез на три цифрови ПИ-регулатора на база на моделно-ориентиран подход чрез три линеаризирани модела. Линеаризираните модели са получени в предходна работа от съответните нелинейни. Получените регулатори са въведени в Simulink® и е извършена тяхната оптимална настройка в условия на числена симулация. Оптимално настроените регулатори от линеаризираните модели са сравнени по качество чрез физически експеримент върху кормилна електрохидравлична задвижваща система с цифрово управление. Извършен е сравнителен анализ на резултатите от експерименталните изследвания.

Г8-19. Митов, Ал., Й. Кралев, Ил. Ангелов, Синтез и оптимална настройка на цифрови ПИ-регулатори по експериментални честотни характеристики за електрохидравлична кормилна система, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2016", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, т.2, стр.93÷100, 2016.

Резюме: Извършен е синтез на два програмируеми цифрови ПИ-регулатора за електрохидравлична кормилна система предназначена за бавноходни мобилни машини. Регулаторите се основават на получени в предходна работа експериментални честотни характеристики на изследваната система. Те са въведени в среда на MATLAB®/Simulink®, където са настроени чрез итеративна процедура за оптимизация. Оптимално настроените регулатори са програмирани в контролер за мобилни приложения и са сравнени по качество чрез физически експеримент върху кормилна електрохидравлична задвижваща система с цифрово управление. Извършен е сравнителен анализ на резултатите получени в условия на експеримент и числена симулация.

Г8-20. Mitov Al., J. Kraliev, Il. Angelov, Digital cascade pressure and position regulator for electrohydraulic steering system, Научна конференция "ПУ и СУ 2016", Русе, Научни трудове, ISSN 1311-3321, стр.183÷189, 2016.

Резюме: В каскадните системи вътрешният контур е с по-високо бързодействие в сравнение с по-външните контури. Регулаторът в него се настройва най-вече от изискванията за максимално бързодействие и потискане на смущаващите сигнали, а външните контури се настройват според изискванията за точност в установен режим. Основна цел на настоящата работа е да представи проектиране и реализация на цифров регулатор с каскадна структура включваща обратни връзки по налягане и позиция, предназначен за вграждане в електрохидравлична кормилна система с приложение в бавноходни (нискоскоростни) мобилни машини.

Г8-21. Митов, Ал., Ил. Ангелов, Й. Кралев, Проучване и анализ на съществуващи схемни решения на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства, Национална конференция с международно участие „Сливен` 2017“, Сливен, сп. Топлотехника, стр.24÷29, ISSN 1314-2550, 2017.

Резюме: Извършено е проучване и анализ на съществуващи схемни решения, както на конвенционални хидравлични кормилни устройства за мобилни машини, така и на вгражданите в тях управляващи електрохидравлични модули осигуряващи възможността за цифрово управление. Обобщени са предимствата и недостатъците на хидравличните кормилни системи с конвенционално хидромеханично управление, и на тези с цифрово електрохидравлично управление. Анализиран е конкретен вид електрохидравличен управляващ модул (PVE) и е представен аналитичен математичен модел даващ възможност за по-нататъшното изследване на поведението и характеристиките на модула в условия на числена симулация.

Г8-22. Митов, Ал., Й. Кралев, Ил. Ангелов, Моделиране в среда на Simulink® на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2017", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, стр.77÷86, т.2, 2017.

Резюме: Въз основа на извършените в предходни работи проучване, анализ и математично моделиране на конкретен тип електрохидравличен управляващ модул (PVE) служещ за цифрово управление на хидравлични кормилни устройства (ХКУ), в настоящата работа е представена реализацията на математичния модел в среда на Simulink®. Извършена е оптимална настройка на вграден в модела цифров ПИД регулатор. Представени са резултати от реакцията на следящ хидравличен разпределител управляван от модула.

Г8-23. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, Ts. Slavov, Identification and synthesis of linear-quadratic regulator for digital control of electrohydraulic steering system, 11th International Fluid Power Conference, 11th IFK`2018, ISBN 978-3-9816480-1-0, RWTH Aachen, Germany, 2018.

Резюме: В работата е синтезиран оптимален алгоритъм за управление на електрохидравлична кормилна система въз основа на идентификация на многомерен модел, линейно-квадратичен функционал за качество и филтър на *Калман* за оценка на състоянието. Разработен е лабораторният стенд, който включва електрохидравлично кормилно устройство (ЕХКУ), хидравличен сервоцилиндр, 32-битов контролер, кормилна колона и джойстик. Класическият подход за управление на такива системи прилага ПИ закон реализиран в цифров вид или като хидромеханична обратна връзка. Настоящата статия синтезира многомерен регулатор, целта на който е да подобри качествата на затворената система.

Г8-24. Митов, Ал., Ц. Славов, Й. Крлев, Ил. Ангелов, Линейно квадратично управление на електрохидравлична кормилна система, Научна конференция с международно участие "Автоматика - 2018", Созопол, Годишник на Технически университет – София, ISSN 1311-0829, Proceedings of Technical University of Sofia , Vol. 68, Issue 2, pp.242÷254, 2018.

Резюме: Целта на работата е да представи един подход за управление на електрохидравлична кормилна система, която е подходяща за бавноходни мобилни машини. Затворената система трябва да има високо бързодействие, без пререгулиране и без статична грешка за целия работен ход на изпълнителния хидравличен цилиндър. Въз основа на записани данни от работата на кормилната система е идентифициран многомерен модел на динамиката. Този модел е валидиран чрез независима извадка данни. Синтезиран е линейно-квадратичен регулатор с филтър на *Калман*. Регулаторът е вграден в специализиран за мобилни приложения 32-битов контролер на Danfoss. Представени са експериментални изследвания на затворената система, които потвърждават нейното качество.

Г8-25. Ангелов, Ил., Ал. Митов, Й. Крлев. Стенд за изследване на електрохидравлична система за кормилна уредба с чувствителност по натоварване, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2018", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, стр. 319÷326, 2018.

Резюме: Работата представя схемно решение, компоновка и реализация на нов лабораторен стенд за изследване на електрохидравлична система за кормилна уредба с чувствителност към изменение на външното натоварване (load-sensing meter-in flow control circuit) върху изпълнителен серво цилиндър. Хидравличната задвижваща система реализирана на стенда се състои основно от: регулируема аксиално-бутална помпа с регулатор по налягане, конвенционално хидравлично кормилно устройство, разработен хидравличен блок за управление на хидравлични кормилни системи в различни режими и двойнодействащ равноплъщен серво цилиндър. Показани са експериментални резултати от пускането в действие и избор на подходяща структура на система за управление на стенда.

Г8-26. Митов, Ал., Ц. Славов, Й. Крлев, Ил. Ангелов. H_{∞} регулатор на електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2018", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, стр. 327÷335, 2018.

Резюме: Представен е алгоритъм за оптимално следене на позиция от серво цилиндър в електрохидравлична кормилна система, който е получен чрез H_{∞} синтез въз основа на идентификация на многомерен модел. Експерименталните изследвания са извършени на лабораторен стенд за изпитване на кормилни устройства за мобилни машини. Представеният съвременен метод за управление позволява достигане на по-

високи показатели за качество на затворената система в сравнение с класическите ПИД закони.

Г8-27. Ангелов, Ил., Н. Станчев, **Ал. Митов**. *Установка за експериментално изследване на електрохидравлични следящи системи с обемно регулиране на скоростта на изпълнителния механизъм*, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2018", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, стр. 336÷343, 2018.

Резюме: Представено е схемно решение, конструктивно изпълнение и компоновка на експериментална уредба за изследване на електрохидравлични следящи позиционни системи с обемно регулиране на скоростта на движение на различни видове хидродвигатели. Разработеното схемно решение дава възможност за промяна на работните параметри на хидравличната задвижваща системата. Предложена е методика за провеждане на експериментални изследвания при промяна на външното натоварване.

Г8-28. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov, *Investigation of robust stability of electro-hydraulic control module for hydraulic steering system with linear-quadratic regulator*, МНК "ПУ и СУ" 2018", Русе, Научни трудове, ISSN 1311-3321, 2018.

Резюме: Основната цел на настоящата работа е да се синтезира и реализира управляващо устройство на ЕХКУ, което да осигури робастна устойчивост и робастно качество на системата за управление. За постигането на тази цел, на базата на получен чрез средствата на идентификацията модел е синтезиран линейно-квадратичен Гаусов регулатор с интегрално действие. Робастната устойчивост на системата за управление е изследвана с помощта на разработения модел на ЕХКУ с входна мултипликативна неопределеност. Синтезираният регулатор е реализиран в 32-битов контролер на стенд за изследване на електрохидравлични кормилни устройства. Проведени са редица експерименти с разработената система за управление на ЕХКУ.

Г8-29. Митов, Ал., Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов, *Изследване робастната устойчивост на вграден H_{∞} регулатор за кормилна електрохидравлична задвижваща система*, Научна конференция с международно участие "Автоматика - 2019", Созопол, Годишник на Технически университет – София, ISSN 1311-0829, Proceedings of Technical University of Sofia, Volume 69, Issue 2, pp.325÷334, 2019.

Резюме: Изследвана е робастната устойчивост на вграден робастен регулатор в кормилна електрохидравлична задвижваща система предназначен за оптимално следене на позиция от серво цилиндър. Регулаторът е получен чрез H_{∞} синтез извършен на база на идентификация на многомерен модел. Във връзка с изследването на робастната устойчивост в модела е въведена параметрична неопределеност. Настоящата работа доказва, че затворената система запазва своята устойчивост при наличието на входна мултипликативна неопределеност дължаща се на наличието на нелинейности в хидравличните кормилни устройства предназначени за бавноходни мобилни машини. Ефективността на синтезирания H_{∞} регулатор е потвърдена експериментално на лабораторен стенд.

Г8-30. Angelov, Il., **Al. Mitov**, P. Kyorgogov, *Switch control algorithm of hydrostatic power transmission applied to wind turbines*, Национален форум „Дни на механиката“, 23-ти Национален семинар по механика на непрекъснатите среди, МДУ „Фредерик Жолио-Кюри“, к. к. „Св. св. Константин и Елена“, Варна, 2019, сп. Механика на машините, Vol. 124, Issue 1, ISSN 0861-9727, стр. 75÷80, 2020.

Резюме: В статията е представен управляващ алгоритъм за безстепенно превключване на хидравлични двигатели на хидростатична трансмисия предназначена

за предаване на механичната енергия от вятърна турбина към електрогенератор. Показана е разработената хидравлична схема на лабораторна установка за експериментално изследване на хидростатичната трансмисия подходяща за приложение в енергийни системи с мощност до 200kW. В основата на управляващия алгоритъм е комбинаторна зависимост за паралелна работа на хидравличните двигатели в трансмисията в зависимост от техния работен обем. Това дава възможност за синтез на такъв вид енергопреобразуващи системи в зависимост от основните енергийни параметри, както на хидростатичната трансмисия, така и на електрогенератора.

Г8-31. Митов, Ал., Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов, *Вграден робастен μ -регулатор в електрохидравличен управляващ модул за цифрово управление на хидравлични кормилни системи*, Научна конференция с международно участие "ЕМФ – 2019", Созопол, ISSN 1314-5371, Сборник доклади, стр. 299÷309, 2019.

Резюме: Проектиран е робастен μ -регулатор за електрохидравлична кормилна система, който е вграден в промишлен 32-битов контролер и е експериментално изследван в лабораторни условия. Проектираният регулатор е получен въз основа на многомерен модел в пространство на състоянията с входна мултипликативна неопределеност, отчитаща немоделираните динамични ефекти, дължащи се на нелинейности в кормилната система. Извършен е анализ на робастната устойчивост и робастното качество. Резултатите показват, че проектираният и реализиран μ -регулатор ще запази своето робастно качество при 25% по-голяма неопределеност и ще запази своята робастна устойчивост при около 30% по-голяма неопределеност.

Г8-32. Митов, Ал., Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов, *Сравнителен анализ на робастната устойчивост на линейно-квадратичен и H_∞ регулатор за електрохидравлична кормилна система*, 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, , Сборник доклади, ISBN 978-954-397-045-2, стр.222÷228, 2019.

Резюме: Статията представя сравнителен анализ на робастната устойчивост на вградени системи за управление на електрохидравлична кормилна система реализирани с LQG и H_∞ регулатори. Робастната устойчивост е изследвана с помощта на идентификация на модел в пространство на състоянията на кормилната система с входна мултипликативна неопределеност, която отчита отклоненията на параметрите, характеризирани въздействието на управляващия сигнал върху състоянието на модела. Извършени са редица експерименти, които потвърждават качеството на електрохидравличната кормилна система за управление. H_∞ регулатора постига по-малка стойност на структурираното сингулярно число от LQG регулатора, което показва, че робастната устойчивост при наличие на ограничени изменения в параметрите на модела се увеличава в случая с H_∞ регулатор. Ефективността на двата регулатора е потвърдена експериментално на лабораторен стенд.

Г8-33. Митов, Ал., Й. Кралев, Ц. Славов, Ил. Ангелов, *Стенд за изследване на системи за управление на кормилна електрохидравлична задвижваща система*, Научна конференция с международно участие "Автоматика - 2020", Созопол, Годишник на Технически университет – София, ISSN 1311-0829, Proceedings of Technical University of Sofia , Vol. 70, Issue 4, pp.67÷76, 2020.

Резюме: В работата са представени резултатите от проектирането и реализацията на лабораторна установка за изследване на системи за управление на електрохидравлична кормилна уредба за бавноходни машини. Извършена е проверка на работоспособността на разработена от авторите система за управление на електрохидравлично кормилно устройство (ЕХКУ), базирана на робастен H_∞ регулатор.

В сравнение с други подобни разработки, тук се използва допълнителна обратна връзка по позицията на плунжера в пропорционалния хидравличен разпределител (LVDT) вграден в ЕХКУ, с помощта на която се постига по-добро качество на управление. Синтезът на регулатора се базира на решаване на задача за смесена чувствителност по многомерен модел с три изхода и един вход, получен със средствата на идентификацията. Експерименталните изследвания показват работоспособността на разработената система.

17.02.2021г.
София



Кандидат:.....
/гл. ас. д-р инж. Александър Митов/

SUMMARIES OF SCIENTIFIC PAPERS

Ch. Assist. Prof. Eng. ALEXANDER STOYANOV MITOV, Ph.D.
FOR PARTICIPATION IN THE COMPETITION FOR APPOINTMENT
TO AN ACADEMIC POSITION "ASSOCIATE PROFESSOR" IN THE
PROFESSIONAL FIELD 5.1. "MECHANICAL ENGINEERING" IN THE
SCIENTIFIC SPECIALTY "HYDRAULIC AND PNEUMATIC DRIVE
SYSTEMS" FACULTY OF POWER ENGINEERING AND POWER
MACHINES, DEPARTMENT OF HYDROAERODYNAMICS AND
HYDRAULIC MACHINES, PUBLISHED IN SG: ISSUE 100 FROM
24.11.2020.

The submitted works for participation in the competition include 49 scientific publications other than those of the dissertation and 1 textbook co-authored.

A laboratory for research of electrohydraulic drive systems for steering systems of mobile machines has been created. Most of the publications reflect the candidate's work under 9 research contracts (2 leadership by him) and the development of various laboratory test rigs and laboratory setups that are implemented in the learning process.

The research activity has a scientific - applied and applied character. It covers the areas of *analysis, synthesis and experimental investigation of electrohydraulic drive and control systems, simulation research of electrohydraulic devices and drive systems with digital control, modelling and identification of electrohydraulic drive systems, development of classical and advanced control techniques through programmable platforms, design and realization of laboratory test rigs for experimental research of electrohydraulic steering systems (EHSS) with possibility for assessment of the workability and performance of various embedded control systems.*

Different types of computing devices such as personal computers, programmable logic controllers (PLC) and digital signal controllers are used in the implementation of control systems. The experimental studies were performed with the help of specialized measuring equipment enabling processing and real-time visualization of signals for different hydraulic and mechanical values.

In this aspect, the summaries of the scientific papers are systematized according to the presented author's references by performance indicators:

I. GROUP B4: Habilitation work - scientific publications (not less than 10) in issues that are referenced and indexed in world databases with scientific information (B4-1÷B4-11).

Eleven of the publications [B4-1÷B4-11], published in specialized scientific journals, which are referenced and indexed in world-famous databases of scientific information (SCOPUS and/or WoS), are included as equivalent to a monograph and can be summarize in the direction:

“Synthesis and implementation of embedded control systems for electrohydraulic power steering for low-speed mobile machines”.

In modern mobile machines, the need for proportional electrical control of the steering system is a consequence of the need for remote control via GPS. In addition, the implementation of mechanical control with a variable steering ratio from the steering wheel to the steered axle of the machine is often a sought-after function to improve productivity and driver comfort. In this aspect, there is a growing need for the development of electrohydraulic control modules (EHCM) serving for pilot digital control of hydraulic steering units (HSU), used in steering systems for low-speed mobile machines with a maximum speed of up to 60 km/h.

In the automation of a number of industrial applications, proportional-integral-differential (PID) laws are applied for control and development of cascade systems based on them.

Initially, a synthesis of different PI controllers obtained by different structural models synthesized from experimental data, measured in the form of time and frequency characteristics. The setting of the variants of the PI controller is performed by iterative optimization procedures, based on the of non-linear least squares method and in fulfillment of specific requirements for control performance. This approach for control is presented in papers **[B4-1, B4-2, B4-5, B4-11]**.

In the electrohydraulic power steering systems for mobile machines it is necessary to use feedback on various parameters, which is a consequence not only of the need for precise positioning, but also due to the presence of external forces acting on the steered wheels, which act as disturbances when cornering. In such multivariable systems, the setting of embedded controllers is complicated by the presence of cross-connections between the channels. Therefore, in the case of multivariable plants, control laws derived from optimality criteria on the transfer matrix of the plant are more appropriate **[B4-4, B4-8, B4-9, B4-10]**.

In addition, in the case of a remote control via a controller, the behavior of the machine strongly depends on the embedded control algorithm (controller). The control performance for this case can be improved by deriving a more accurate model of the plant. In mathematical modeling, a compromise is always required between the complexity (determined by the order of the dynamic components) of the model used and the accuracy of the approximation. In complex models, it is more difficult to find important mathematical properties for control, and more accurate models allow to achieve higher performance indices. Complex models are usually suitable for analyzing the dynamics of the system, but are inconvenient for the design of the controllers.

Two approaches are most often used to determine a mathematical model of an electrohydraulic steering system - *physical modeling or system identification*. Physical modeling requires in-depth knowledge of the structure of the plant and the relevant physical parameters (flow-pressure characteristics, hydraulic resistances, volumes, geometry of the control edges of the spools, etc.). Due to the lack of a priori information, a numerical model obtained by an identification procedure based on experimental data, shown in detail in papers **[B4-3, B4-6, G8-23]**, is studied. Another reason for this approach is the ability to derive a noise model that can be used to design an optimal *Kalman* filter. The purpose of the identification is to arrive at a linear black box model which sufficiently well describes the dynamics of the electrohydraulic steering system and the interfering disturbances for the entire working range. To obtain this model, experiments were performed with the object in an open loop. The sampling rate is chosen small enough. To provide the necessary excitation to the plant a random binary signal (RBS) was used - obtained as a white *Gaussian* noise passed through a relay element.

Based on the state space models obtained from the identification, multivariable controllers have been synthesized - a linear quadratic Gaussian (LQG) controller, H^∞ controller and a μ -controller. Their design, synthesis and implementation are presented in papers **[B4-4, B4-8, B4-9, B4-10]**.

In the design of an LQG controller based on an identification model, the assessment of the condition is essential, as the state variables are not measurable and represent a complex combination of physical variables of the plant. An observer algorithm has been designed to evaluate the condition. However, the dynamics of the observer affect the dynamics of the closed-loop system and must be carefully settled. The *Kalman* filter algorithm is a common state estimator that adjusts observer dynamics by introducing a precise balance between model signal uncertainty and measurable noise. However, it is necessary to know the noise model. In addition, another advantage of the systems identification model is their statistical characteristics, which allows the determination of the mentioned parameters required for the synthesis of the *Kalman* filter.

The ultimate goal of embedded electronics in hydraulic devices is to improve performance, safety and diagnostic capabilities (ISO 13849-1). Since hydraulic elements and drive devices are designed for maximum energy efficiency, their designs are characterized by nonlinearity in their modeling. The uncertainty caused by these elements can impair the sustainability and efficiency of a closed-loop control system. Embedded algorithms must be carefully examined

for uncertainty before embedding in the real machine. For this reason, studies have been conducted on robust resistance and robust quality in works [B4-8, B4-9, B4-10].

For this purpose, an input multiplicative uncertainty has been introduced in the model, taking into account the unmodelled dynamic effects due to nonlinearities in the electrohydraulic steering devices. The system is represented as an $M - \Delta$ structure enabling to calculate the structured singular number (μ) of the closed-loop control system, which number is minimized by a $D - K$ iterative algorithm providing robust stability and robust performance of the entire electrohydraulic drive system.

All results obtained during the synthesis of the controllers designed in simulation conditions (represented by time and frequency characteristics) are validated experimentally in the indicated works on the basis of the developed laboratory test rigs for EHSS research, presented in papers [B4-1, B4-2, B4-7] .

Scientific papers Group B4:

B4-1. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Design of digital PI regulators from experimental frequency response of electrohydraulic steering system*, 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-1-5090-6690-2, pp.400÷405, Sofia, 2017, DOI: 10.1109/ELMA.2017.7955472.

Abstract: The paper presents the setting of two digital PI controllers for electrohydraulic steering system designed for low-speed mobile machines. The controllers are based on experimentally measured frequency response of a steering system. This response is approximated with two rational transfer functions. They are basis for design of corresponding digital PI regulators with iterative optimization procedure in MATLAB®/Simulink®. Regulators parameters are programmed into a microcontroller for mobile applications and their performances are compared through physical experiment on the steering electrohydraulic drive system with digital control.

B4-2. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Investigation of model-based tuning of PI regulator for electrohydraulic steering system*, The 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT), ISBN 978-153863434-9, pp.318÷323, Munich, Germany, 2017, DOI: 10.1109/ICUMT.2017.8255165.

Abstract: The article presents the optimal setting of eight PI controllers with different settings of their parameters, synthesized through a model-based approach. The parameters of the controllers are determined by a numerical optimization procedure on the basis of derived different simulation models based on experimentally obtained time and frequency characteristics of the plant. The controllers are embedded in a microcontroller for mobile applications and their results are compared experimentally when controlling the steering cylinder piston position. The results show that the parameters strongly depend on the choice of mathematical model describing the dynamics of electrohydraulic power steering system. Despite the different mathematical structure of the model, physical experiments with different controllers show similar performance analyzed by relevant performance indices.

B4-3. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Embedded Electrohydraulic Controller with Digital Valve Actuation for Steering of Heavy Duty Machines*, The 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO'2018, ISBN 978-153865682-2, Budva, Montenegro, 2018, DOI: 10.1109/MECO.2018.8406011.

Abstract: The embedded control system for EHSU of heavy mobile machinery is designed. The purpose of the paper is to evaluate two digital PI controllers designed for embedded electro-hydraulic control module (EHCM) optimally tuned based on identified nonlinear models - analytical model based on physical components implemented into the construction of electrohydraulic steering unit (EHSU) - physical analogy model and nonlinear autoregressive model (Nonlinear ARX). Physical analogy model is kind of "grey box" model

where physical structure is predefined and the physical parameter values are unknown. The non-linear ARX model is a “black box” model that describes only the input-output functional behavior of the system.

B4-4. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov, *H-infinity Control of an Electrohydraulic Power Steering System*, 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP - 2018, ISBN 978-1-5386-4695-3, pp.690÷693, Athens, Greece, 2018, DOI: 10.1109/TSP.2018.8441398.

Abstract: The paper presents an optimal reference tracking algorithm for electrohydraulic steering systems which is based on multivariable system identification and H_∞ controller. A laboratory test bench for experimental investigation composed of electrohydraulic control module, hydraulic steering unit (HSU with steering wheel), steering servo cylinder, 32-bit microcontroller and joystick supports experimental work. Software for implementation of the designed H_∞ controller in the microcontroller of laboratory test bench has been developed. Conventional approach for reference tracking in steering is usually based on classical PID control law. In contrast, in this paper reference tracking is performed by using advanced control techniques, which can take into account the multivariable nature of the process. In this way a higher closed-loop performance is achieved.

B4-5. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Cascade control algorithm of test bench for studying load-sensing electrohydraulic steering systems*, International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, BulTrans-2018, Proceedings Matec Web of Conference, ISSN 2261-236X, **SJR:0.166**, 2018, DOI: 10.1051/mateconf/201823402006.

Abstract: The paper presents the design and synthesis of a three-loop cascade control system with a digital PI controller intended for installation in a test bench for load-sensing electrohydraulic steering units. The structure and layout of both the hydraulic system and the control system are shown. The cascade control system consists of three controllers for measurable variables: proportional spool valve position, steering velocity and steering cylinder position. The developed control algorithm is embedded into a 32-bit microcontroller for mobile applications. Experimental studies have been carried out to present the performance of the entire electrohydraulic system. The experimental results confirm closed-loop performance which is tested with two different reference trajectories typical for steering applications – joystick generated and pre-programmed. The developed control algorithm will serve as a basis for further study of the system with advanced control techniques implementable in low speed mobile machines. The equipment of a variable displacement axial-piston pump with a pressure controller (type “DR”), as well as the incorporation of modern technical measuring instruments, enable the real-time measurement of a number of mechanical and hydraulic parameters. This in turn contributes to the study of the energy efficiency of the system with the inclusion of various hydro mechanical control devices of the pump.

B4-6. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *SIMO System Identification of Transfer Function Model for Electrohydraulic Power Steering*, 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-172811413-2, pp. 130÷135, Sofia, 2019, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771571.

Abstract: The paper presents the identification procedure for obtaining of transfer function model of an electrohydraulic power steering systems for low speed mobile machines. The single-input, multiple-output (SIMO) system model was obtained based on experimentally measured data from a laboratory test bench steering system. Proportional spool valve position, flow rate supply and steering cylinder position output variables are measured in an open-loop identification experiment. The identified SIMO model is validated with independent data-set and reduced to third order transfer functions. The resulting model will serve for further work on the synthesis of multivariable embedded controllers for the electrohydraulic power steering systems.

B4-7. Mitov, Al., *Implementation of Embedded Three-Loop Control Algorithm for Electrohydraulic Power Steering System*, 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-172811413-2, pp.136÷141, Sofia, 2019, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771478.

Abstract: The paper presents the design, synthesis and implementation of a three-loop cascade control algorithm with a digital proportional integral regulator intended for installation in a modern electrohydraulic power steering systems for low speed vehicles. The developed control algorithm is embedded into a 32-bit microcontroller of a laboratory test rig. Embedded software has been developed, representing a structure of functional blocks, generating executable machine code, as well as the subsequent input and launch on the platform. The embedded procedure based on the PLUS+1 Guide (Danfoss) programming environment suitable for the used microcontroller is detail presented. The study of the noise generated by the sensors used in the experimental investigation is performed, as well as an analysis of their accuracy.

B4-8. Mitov, Al., J. Kraleв, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Robust Stability of Electro-Hydraulic Power Steering System with H-infinity Controller*, The 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing - MECO'2019, ISBN 978-172811739-3, Budva, Montenegro, 2019, DOI: 10.1109/MECO.2019.8760060.

Abstract: The paper investigates robust stability of an embedded robust controller for optimal reference tracking of electrohydraulic steering systems. The controller is synthesized on the base of multivariable system identification and H_∞ cost function. In order to describe the system in robust control framework a small uncertainty is introduced into the model. Then the system is represented as a $M - \Delta$ interconnection which allows to calculate the structured singular value (μ) of the closed-loop system with the H_∞ controller. This singular value is a measure of the loop stability in presence of bounded variations in the model characteristics in frequency domain or in its parameters. The present paper proves that the closed-loop system keeps its stability in presence of input multiplicative uncertainty caused by the inherent nonlinearities in the hydraulic steering units. The performance of the H_∞ controller is experimentally verified on laboratory test bench.

B4-9. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Kraleв, Il. Angelov, *Comparison of Robust Stability for Electrohydraulic Steering Control System Based on LQG and H-infinity Controller*, 42st International Conference on Telecommunications and Signal Processing – TSP - 2019, IEEE Conference, ISBN 978-1-5386-4695-3, pp. 712÷715, Budapest, Hungary, 2019, DOI: 10.1109/TSP.2019.8769034.

Abstract: The paper compares the robust stability of two embedded controllers applied in electrohydraulic steering systems - linear-quadratic *Gaussian* (LQG) controller and H-infinity controller. Both controllers are synthesized on the base of state-space system model obtained with identification. To investigate robust stability of the closed-loop system 30% parametric uncertainty is introduced into B matrix of the model which describes the observed hysteresis of the electrohydraulic actuator. The closed-loop system is represented as $M - \Delta$ interconnection which allows calculation of its structured singular value (μ) with both controllers. The H_∞ controller achieves smaller singular value than the LQG controller which asserts that loop stability in presence of bounded variations in the model characteristics is increased in the case of H_∞ controller. The performance of both controllers is experimentally verified on laboratory test bench.

B4-10. Kraleв, J., Al. Mitov, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Robust μ -Controller for Electrohydraulic Steering System*, 18th International Conference on Smart Technologies - EUROCON 2019, ISBN 978-153869301-8, pp.1÷6, Novi Sad, Serbia, 2019, DOI: 10.1109/EUROCON.2019.8861982.

Abstract: The paper presents the design of robust μ -controller for a laboratory test bench composed of electrohydraulic steering unit (EHSU), steering cylinder, 32-bit microcontroller, steering wheel and joystick. The controller design is based on an identified

multivariable linear state space model of the test bench. Uncertain elements are introduced in the model from identification to account for unmodelled dynamic effects due to nonlinearities. Then the system is represented in a robust control framework and the structured singular value of the closed-loop system is minimized with a $D - K$ iterative procedure to obtain robust stability and robust performance.

B4-11. Kralev, J., **Al. Mitov**, Ts. Slavov, Il. Angelov. *Optimal three-loop cascade PI-P-PI controller for electro-hydraulic power steering system*, International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies, BulTrans-2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 664, Sozopol, Bulgaria, ISSN 1757-8981, pp.1÷11, **SJR:0.198**, 2019, DOI: 10.1088/1757-899X/664/1/012011.

Abstract: The present paper presents an optimally tuned proportional integral differential (PID) system which calculates the input signal for the switching valves in order to achieve steering trajectory tracking. The designed cascade control algorithm consists of three PID controllers respectively for the spool valve position, for the effective flow rate and for the steering cylinder position. The stages of the cascade control algorithm synthesis are presented. The goals of control algorithm are to achieve fast transients with minimal overshoot and steady state error. Controllers' are tuned consequently by starting from the innermost loop based on an identified single input multiple output (SIMO) model of the steering system by optimization algorithm with a quadratic cost. After one of the controllers is successfully tuned the model of the corresponding closed-loop system is approximated and employed in the optimization procedure for the next control loop from the cascade system. The developed control algorithm is programmed into a specialized vehicle microcontroller and tested on a laboratory steering system test bench.

II. GROUP G7: Scientific publications in issues that are referenced and indexed in world scientific data bases (G7-1÷G7-5).

The high degree of automation in the use of electronic control in almost all industrial and mobile applications is most often achieved by proportional electro-hydraulic control devices, in which the control element moves in proportion to the change of the input electrical signal. This makes it possible to change the main energy parameters in the system - pressure and flow rate and the implementation of adaptive proportional electrical control. The focus of this study is on piezoelectric actuators used as electromechanical transducers suitable for driving and controlling high-response hydraulic valves having a relatively small dead zone. In **[G7-1]** a detailed analysis of various existing structures was performed, on the basis of which a conceptual model was developed. A three-dimensional virtual prototype was developed, which was used to study various parameters in simulation conditions. Based on these studies, a hydraulic valve design with proportional electrical control by a piezoelectric transducer has been developed.

Hydraulic and electrohydraulic servo systems are widely used in the automation of many processes in industry, transport and aviation. The control part of these systems consists of mechanical or electronic devices that perceive the setting effect from the sensing elements or the computing devices, compare them with the feedback signals and form signals for control of the power part consisting of regulating devices and actuating hydraulic motors.

Electro-hydraulic servo systems can be designed to control various physical variables such as position, force, pressure, speed, acceleration and more. When high response and accuracy are required to drive and control systems with relatively large masses on which large external forces act, most often the application of electrohydraulic servo systems is the optimal option for solving the problem of drive, regulation and control.

In **[G7-2]** a schematic solution of an electrohydraulic servo positioning system was developed, a synthesis of the main parameters was performed and the system was assembled in the form of a laboratory test bench. The basis of the developed test bench is an axial-piston variable displacement pump equipped with a flow and pressure controller (type "DFR", *Rexroth® Bosch Group*), realized on the basis of a proportional hydraulic valve with high natural

frequency. The laboratory test bench allows for experimental investigation with various actuators - hydraulic servo cylinder or rotary hydraulic motor. The closed-loop control system is realized with speed and load feedback of the executive hydraulic motors. The inclusion of an alternative controller with proportional electrical control (system type "SYDFE", *Rexroth® Bosch Group*) allows for experimental studies not only when changing the hydraulic parameters, but also the parameters of the embedded control system. Such studies were performed in [G7-3, G7-4], which compared two linear-quadratic *Gaussian* (LQG) controllers with a *Kalman* filter for an electrohydraulic servo system in numerical simulation and real experiment conditions. The focus in [G7-3] is on the presented advanced version of the LQG controller. An initial version [G8-23] of the embedded control system with this type of controller has been developed, which contains feedback on the pressure drop in the two working chambers of the servo cylinder and on the piston position. Due to the low sensitivity of the LQG controller to the outlet pressure channel, in this work a controller with additional feedback on the spool position (LVDT) of a proportional valve with indirect electrohydraulic control (integrated in the electrohydraulic control unit) and on the flow supply unit has been developed. The introduction of feedback on the position of the regulating element in the proportional valve allows more precise processing of setpoint positions on the piston of the actuator servo cylinder. The other additional flow feedback supplying the electrohydraulic control unit allows for energy analysis of the entire electrohydraulic system. Also, to ensure good enough monitoring of the setpoint, an LQG controller with integrated action is designed [G7-3, G7-4].

On the other hand, sufficiently good position reference monitoring can be achieved by a model-predictive controller (MPC) designed for an electrohydraulic servo system, which is designed and tested in paper [G7-5]. The embedded electro-hydraulic control system based on MPC has some advantages over conventional control laws, which are the ability to overcome the limitations in the dead zone of the proportional hydraulic valve. This is a common problem, as this area is a consequence of the positive overlap imposed by safety standards (ISO 13849-1, EU Machinery Directive), which exclude the possibility of self-driving to these systems. The main goal of MPC is to minimize the criterion of efficiency in terms of limitations of system inputs and system outputs. Applied to control systems, the MPC algorithm optimizes the future value of the control signal by minimizing the integral of the error between the reference signal and the predicted output, and the square of the control signal of the system at each sampling rate. A disadvantage of the algorithm is the need to use a large computing resource.

Scientific papers Group G7:

G7-1. Angelov, Il., K. Kamberov, **Al. Mitov**, Ts. Ivanov, *Implementation of piezoelectric actuators for pilot valve of high response hydraulic servo valve*, 4th EAI International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures - Fabulous 2019, Sofia, Bulgaria, *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (ICST)*, ISBN 978-3-030-23975-6, **SJR:0151**, pp.318÷326, Springer-Switzerland, 2019, DOI: 10.1007/978-3-030-23976-3_28.

Abstract: The high degree of automation in the use of electronic control in all industrial and mobile applications is most often done by hydraulic proportional control devices, where the regulating element changes remotely in proportion to the electrical signal. This provides the possibility to change the parameters of the hydraulic energy – flow rate and pressure – a realization of adaptive control by proportional electric control. The focus of this study is set on piezoelectric actuators that are electromechanical transducers, suitable for driving and controlling high-speed hydraulic actuators and relatively small insensitive zones. Detailed analysis of various existing designs is performed prior to development of conceptual model. Further, a design exploration is performed through virtual prototypes that helps studying in high level of detail various technical parameters. It is of great importance for successive design development as some of the controlled parameters (as deformations) are very sensitive and has great influence over device performance.

G7-2. Angelov, Il., N. Stanchev, **Al. Mitov**, *Experimental Study of Electronically Controlled Closed-Loop Electrohydraulic System with Variable Displacement Pump*, 16th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), ISBN 978-1-5090-6690-2, pp.541÷545, Sofia, 2019, DOI: 10.1109/ELMA.2019.8771489.

Abstract: The article presents the design of the hydraulic circuit diagram, synthesis of the main hydraulic parameters and equipment of experimental setup for studying of an electronically controlled closed-loop electrohydraulic system based on variable displacement axial-piston pump. The basis of the developed setup is a variable displacement axial-piston pump equipped with a flow and pressure controller (type DFR), realized based on a high response proportional valve. The setup allows for experimental investigation with various pressure loads of different types of executive device: hydraulic cylinder or hydraulic motor (type SYDFE). The equipment of the experimental system with an external control electronics provides the possibilities to carry out study not only by changing the hydraulic parameters, but also by varying of the parameters in the embedded control system.

G7-3. Mitov, Al., J. Kralev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Reference Tracking LQG Control of Electrohydraulic Servo System for Mobile Machines*, 10th IEEE International Conference on Intelligent Systems (IS'2020), ISBN 978-172815456-5, pp.475÷480, Varna, Bulgaria, 2020, DOI:10.1109/IS48319.2020.9200178.

Abstract: The main purpose of this work is to present an advanced version of a linear-quadratic *Gaussian* controller with a *Kalman* filter of electro-hydraulic power steering for modern mobile machines. The authors were developed a first version of the embedded control system with this type of controller contains feedbacks in the pressure drop in the two chambers of the steering cylinder and the position of its piston. Due to the low sensitivity of the LQG controller to the pressure output system channel, in this work a controller with additional feedback inputs at spool position of a proportional valve (integrated in the steering unit) and flow rate supplied the unit was developed. The introduction of feedback on the spool position of the proportional valve allows a more precise reference tracking of steering servo cylinder, which is controlled by the proportional valve. The other additional feedback on the flow rate supplying the steering unit enables the analysis of the energy efficiency of the whole system. A main problem in LQG design, based on identification model, is the state estimation because the state variables are not measurable and represent a complex combination of physical variables of the plant. An observer algorithm is designed for state estimation. However the dynamics of the observer impacts the dynamics of the closed-loop systems and have to be carefully set. The *Kalman* filter algorithm is a common state estimator which set the observer dynamics as a precise balance between model uncertainty and the measurement noise. However model uncertainty information and noise variance have to be calculated. The advantage of system identification models are their statistical features which allows determination of these parameters required for *Kalman* filter synthesis. Also to ensure sufficiently well reference tracking an LQG controller with integral action is designed.

G7-4. Mitov, Al., J. Kralev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Real-Time LQG Control Strategies for Electrohydraulic Steering of Mobile Machines*, 21st International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, (SIELA 2020), ISBN 978-172814346-0, pp.294-297, Bourgas, Bulgaria, 2020, DOI: 10.1109/SIELA49118.2020.9167047.

Abstract: The main aim of the article is to compare two real-time control strategies for electrohydraulic power steering system of modern mobile machines with linear-quadratic *Gaussian* (LQG) controllers. The both modification of LQG controller are designed on the basis of two multivariable uncertain plant models. The plant models are obtained by identification procedure via "black box" approach and takes into account the deviations of the parameters that characterize the way that the control signal acts on the state of the models. The difference between the two modifications of the embedded controllers lies in the different types of output

signals, which are used as feedback in control system. The comparative analysis of time and frequency domain properties of controllers are performed. The results obtained show the better performance of one system. The control algorithms are implemented in 32-bit microcontroller. A number of experiments have been executed, which confirm the quality of the electrohydraulic power steering control system.

G7-5. Mitov, Al., J. Kralev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Model Predictive Control Design for Electro-hydraulic Power Steering Application*, The 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO'2020), ISBN 978-172816947-7, pp.658-661, Budva, Montenegro, 2020, DOI: 10.1109/MECO49872.2020.9134222.

Abstract: The paper presents the design and implementation of model predictive controller (MPC) for path tracking of electro-hydraulic servo steering system. The embedded control system is intended for steering application of non-road mobile machines. MPC has a some advantages then conventional control laws. Very important advantages of this control method is the possibilities to overcome the constraints on the dead-band in the proportional spool valve. This is a common problem because it is a consequence of the positive overlap imposed by safety standards on these control systems. The MPC's fundamental objective is to minimize a performance criterion with respect to the limitations of a system inputs and system outputs. Applied to the steering systems, the MPC algorithm optimizes the future control trajectory by minimizing the error between the reference signal and predicted system output at each control interval.

III. GROUP G8: Scientific publications in non refereed journals with scientific review or in edited collective volumes (G8-1÷G8-33).

III.1. Research of dynamic processes and application of digital control in hydraulic drive systems

G8-1. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Analysis of the dynamic characteristics of the pressure in system with fast switching digital control valve*, International Scientific Conference "Machine Science", Sliven, Journal of Thermotechnics, ISSN 1314-2550, b 1, pp.32÷37, 2012.

Abstract: This paper examines dynamic simulation characteristics that represent the pressure variation in a pipeline directly connected to 3/2 fast switching digital control valve. The main goal set by the authors is to improve the existing mathematical model, in order to better match the results of the real experiment. The results of the real and numerical experiment fit with deviations of less than 0.5%.

G8-2. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the influence of hydraulic accumulator on pressure dynamic characteristics in system with fast switching digital control valve*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2012", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, Issue 2, pp.138÷145, 2012.

Abstract: The paper presents synthesized simulation model suitable for the theoretical research of the dynamic pressure variation in a straight pipeline connected to three-way, two-position fast switching digital control valve. Based on this model, an analysis of the influence of a hydraulic accumulator on the dynamic pressure variation in the experimental pipeline was made. In the optimal version at 30bar, the performance is improved in the lowstream pressure zone, which shows that the inclusion of a hydraulic accumulator at certain settings of its volume and gas pressure makes it possible to improve the transient process. This is especially important in digitally controlled fluid power systems in which the inclusion of a hydraulic accumulator serves as a filter for dynamic pressure variation.

G8-3. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the influence of over center valve on pressure dynamic characteristics in system with fast switching digital control valve*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines “PEPM – 2012”, Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, Issue 2, pp.146÷151, 2012.

Abstract: The article presented a synthesis an appropriate simulation model for theoretical investigation of the dynamic pressure characteristics in a straight pipeline to include three-way, two-position fast switching digital control valve. The model is used for analysis of the influence of over-center valve on the dynamic pressure variation in the experimental pipeline. In order to minimize energy losses in systems with digital control and to preserve the type and shape of the pressure characteristic, it is recommended to include a over-center valve, which is set in the range of 1÷5 bar.

G8-4. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the influence of simultaneously connected hydraulic accumulator and over center valve on pressure dynamic characteristics in system with fast switching digital control valve*, Scientific Conference of “Angel Kanchev” University of Ruse 2012, Ruse, Proceedings, ISSN 1311-3321, Vol. 51, book 1.2., pp.120÷125, 2012.

Abstract: This paper presents synthesized simulation model acceptable for the theoretical research of the dynamic pressure variation in a straight pipeline to include three-way, two-position fast switching digital control valve. Based on this model analyzes the influence of simultaneously connected hydraulic accumulator and over-center valve on the dynamic pressure characteristics into the experimental pipeline. The studied combination of hydraulic accumulator and over-center valve included in the system at design and setting parameters shows that it is possible to achieve a correspondence between the type and shape of the input control and output pressure signals, which in turn will lead to high levels of control performance, both in the considered hydraulic drive system with digital control and in other digital fluid power systems realized with this type of control.

G8-5. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the influence of the amplitude of input control signal on pressure dynamic characteristics in system with fast switching digital control valve, hydraulic accumulator and over center valve, хидравлический аккумулятор и подпорен клапан*, Scientific Conference of “Angel Kanchev” University of Ruse, Proceedings, ISSN 1311-3321, Vol. 51, book 1.2., pp.126÷131, 2012.

Abstract: This paper presents synthesized simulation model suitable for the theoretical research of the dynamic pressure variation in a straight pipeline to include three-way, two-position fast switching digital control valve. Based on this model analyses the influence of the amplitude of input control signal on the dynamic pressure variation in the experimental pipeline.

G8-6. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the pressure variation in two symmetrical parallel pipelines to connect with digital control valve*, International Scientific Conference “UNITECH’2012”, Gabrovo, ISSN 1313-230X, Proceedings, Vol. 2, pp.281÷286, 2012.

Abstract: This paper presents synthesized simulation model suitable for the numerical research of the dynamic pressure variation in a straight pipeline to include three-way, two-position fast switching digital control valve. Based on this model analyses the influence of the length of pipelines on the dynamic pressure variation in the hydraulic system with digital control valve.

G8-7. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of dynamic processes in hydraulic system with digital control of actuator device*, International Scientific Conference "Machine Science", Sliven, Journal of Thermotechnics, ISSN 1314-2550, book 2, pp.60÷64, 2013.

Abstract: Researched hydraulic system consisting of two parallel supplied 3/2 hydraulic valves, each of which is connected with a straight pipeline. The output of pipelines are connected to hydraulic actuator device and between each valve and pipeline are connected in series throttle with fixed orifice and a hydraulic accumulator. The results present the transient response of the actuator in due to the synthesis of a simulation model. The research has aimed at the analysis of the influence of the frequency of the input control signal on the response of the hydraulic actuator device in dynamic mode.

G8-8. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Quality assessment of regulation at researching of transients processes of actuator device in the hydraulic system with digital control*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2013", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, Issue 2, pp.101÷108, 2013.

Abstract: This paper researched a hydraulic system consisting two parallel supplied 3/2 hydraulic valves, each of which is connected with a straight pipeline. The output of pipelines are connected to actuator device and between each valve and pipeline are connected in series throttle with fixed orifice and a hydraulic accumulator. The results illustrate the transient response of the actuator in the form of a transition process due to the synthesis of a simulation model. Researches have aimed assessment and analysis of the control performance at different values of stroke of the actuator.

G8-9. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Determining the gain coefficient in the research of transient response of actuator device in digital control hydraulic system*, Scientific Conference of "Angel Kanchev" University of Ruse 2013, Ruse, Proceedings, ISSN 1311-3321, Vol. 52, book 1.2, pp.74÷78, 2013.

Abstract: This paper presents a methodology for determining the gain and steady state position error, according to which the performance indices are evaluated by the transition process. The studied transient characteristics represent a response of an actuator at different frequencies of the input control digital signal and with different values of its stroke. The characteristics are obtained as a result of the synthesis of a mathematical simulation model of the studied experimental system based on the control of an actuator by two or more parallel connected three-way, two-position hydraulic valves, which supplied an actuator.

G8-10. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Hydraulic drive system for pipe bending machine*, International Scientific Conference "UNITECH'2013", Gabrovo, ISSN 1313-230X, Proceedings, Vol. 3, pp.354÷359, 2013.

Abstract: An existing hydraulic system for a pipe bending machine with manual, semi-automatic and automatic operation has been studied. The studies have focused on the analysis of the hydraulic circuit diagram and constructive implementation of the hydraulic system on the basis of calculation of the main parameters. The sequence diagram of the mode of operation for the hydraulic control devices, functional and stroke diagram of implementing hydraulic actuator devices, respectively, with and without control and regulating devices of the feed flow rate towards them are developed. The realized improvement of the hydraulic system, affecting repeatability of accuracy of positioning in time of the process of bending by integrating of additional hydraulic devices. The results of an energy analysis are presented.

G8-11. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research analysis of dynamic processes occurring in pipelines with digitally controlled hydraulic valve*, 9th International Fluid Power Conference, 9th IFK'2014, ISBN 978-3-9816480-1-0, pp.543÷553, Aachen, Germany, 2014.

Abstract: This article presents a research of a hydraulic system consisting of a three-way, two-position hydraulic fast switching valve whose output is connected to a relatively

long pipeline with relatively small cross-section area. The results present dynamic pressure characteristics in the experimental pipeline as transient response due to the synthesis of the simulation model. Based on experimental data, this model is verified and improved for the purpose of accommodating a number of independent studies intended for quantitative assessment of the influences, both additionally equipped with hydraulic devices and parameters of the input control signal on the transient characteristics. By using known simulation model in which is incorporated into the transmission line method (TLM), the influence of the bulk modulus and the kinematic viscosity of the working fluid on the transitional characteristics of the flow rate in the pipeline are determined. Drawing upon research data an assessment of the performance is made by two indexes: logarithmic decrement of damping and settling time. The paper aim is an analysing and summarizing these investigations at establishing and describing digital control systems as an effective application in the pilot control of relatively low, middle and high hydraulic power drives.

G8-12. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Analysis of transient processes of actuator device in a hydraulic system with digital control*, International Conference “Mechatronics`2014”, ISBN 978-91-7063-564-9, pp.141÷150, Karlstad, Sweden, 2014.

Abstract: The subject of this research is a hydraulic system comprising two straight pipelines of relatively small cross section, each of which individually supplied by means of two 3/2 three-way hydraulic directional valves with digital control. Non-adjustable throttle orifices and hydraulic accumulator are connected in series between each valve and pipeline. At their outlets both pipelines are connected to a counter-balance valve. Obtained results of indicate dynamic variation of pressure inside pipelines and are presented as transient processes produced by mathematical simulation model synthesis. Research investigations have been focused on analysing the impact of the throttles’ cross-section size and the phase lag in the valves’ control signal on the dynamic characteristic of pressure in both parallel pipelines.

G8-13. Angelov, Il., **Al. Mitov**, J. Kraleov, *Identification hydraulic drive system with digital control actuator*, International Scientific Conference “Machine Science”, Sliven, Journal of Thermotechnics, ISSN 1314-2550, book 3, pp.53÷58, 2014.

Abstract: In the present work, a structurally modified tuneable model is shown, which allows for identification of an actuator transient response by introducing partial nonlinearity into the feedback. In this way, the oscillating nature of the transient process on the basis of a variable one-dimensional function (look-up table) is evaluated. The main goal is to analyse the transients from the reaction of the studied device, which are evaluated as the control performance indices. In addition, the identification of the transient system serves as a basis for further research aimed at determining the transfer function of the system and its characteristics in the frequency domain.

G8-14. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Comparative Analysis of the Results Obtained from the Identification of Hydraulic Drive System with Digital Control*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines “PEPM – 2014”, Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, Issue 2, pp.110÷118, 2014.

Abstract: This article is a result of the approach for the identification of hydraulic drive system with digital control through numerical approximation of dynamic processes. Dynamic processes in the form of transient characteristics are obtained on the basis of known from previous studies nonlinear mathematical simulation model of the experimental setup. Presented a comprehensive methodology for the system identification and implementation tools. Comparative analysis between the results of identification and those obtained by nonlinear mathematical simulation model in terms of control performance of the studied system has been performed.

G8-15. Angelov, Il., **Al. Mitov**, J. Krlev, *Hydraulic drive system with a closed-loop PID controller*, Scientific Conference of "Angel Kanchev" University of Ruse 2014, Ruse, Proceedings, ISSN 1311-3321, Vol. 53, book 1.2., pp.213÷219, 2014.

Abstract: Following a series of simulation studies of an experimental setup with a hydraulic actuator driven by two three-way two-position valves connected in parallel the present paper considers an experimental setup with PID controller. The main goal of the present work is to show a possibility for control of the hydraulic system considered in previous works in closed-loop control with a discrete PID controller, showing its structure and workability. The analysis of the workability of the controller is performed on the basis of simulation transient response of the actuator during the monitoring of the step reference signal.

G8-16. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Research of the dynamic pressure variation in hydraulic system with two parallel connected digital control valves*, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM), Vol. 4. Issue 7, ISSN 2319 – 4847, pp.176÷181, 2015.

Abstract: The researches of the hydraulic system which consist of two straight pipelines supplied by two separate 3/2 hydraulic fast switched valves. A fixed throttle orifice is switched between each of them. The results show pressure dynamic characteristics in the pipelines in the form of transient characteristics due to the synthesis of a simulation model. The researches aim to analyze the influence of the section size of the fixed throttle, as well as the phase delay in the control signal to the valves, over the pressure characteristics in both parallel pipelines. The results of the present research can be used as a base for the construction of digital hydraulic control systems.

III.2. Investigation of electrohydraulic devices and systems.

G8-17. Angelov, Il., **Al. Mitov**, *Test Bench for Experimental Research and Identification of Electrohydraulic Steering Units*, 10th International Fluid Power Conference, 10th IFK`2016, ISBN 978-3-9816480-1-0, pp.225÷236, Dresden, Germany, 2016.

Abstract: The paper presents design, solution and physical implementation of a system for investigation of electrohydraulic steering units based on OSPE 200 device. The implementation is based on synthesis of required hydraulic and structure parameters, presented in a previous paper. Now we present the interconnection of the digital control system and the closed-loop flow diagram. A formal description of embedded software is presented too, which supports operation of PI control algorithm in real-time. Identification is performed based on experimentally reported the transitional process by developing mathematical models. Presents the structure and capabilities of the models for identification, as well as procedures for their validation.

G8-18. **Mitov, Al.**, J. Krlev, Il. Angelov, *Optimal tuning of digital PI regulators by linear models of steering electrohydraulic drive system*, International Scientific Conference "Machine Science" 2016, Sliven, Journal of Thermotechnics, ISSN 1314-2550, book 1, pp.30÷35, 2017.

Abstract: In this paper were carried out design and synthesis of three digital PI regulators based on model-based approach through three linearized model. Linearized models obtained in previous work by the relevant nonlinear. Linearization of the three models is carried out with the use of the function linearize in an environment of MATLAB®, which is based on the Taylor's method. A comparison of linear patterns in the frequency domain, the results of which are shown.

G8-19. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Synthesis and optimal tuning of digital PI-regulators by frequency characteristics of electrohydraulic steering system*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2016", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, Issue 2, pp.93÷100, 2016.

Abstract: It is carried out synthesis of two programmable digital PI controllers for electrohydraulic steering system designed for low-speed mobile machines. The controllers are based on obtained in previous work frequency characteristics of the steering system. They were introduced in an environment of MATLAB®/Simulink®, which are set through an iterative optimization procedure. Optimal settled regulators are programmed into the microcontroller for mobile applications and compared in performance through physical experiment on the steering electrohydraulic drive system with digital control. The comparative analysis of the results obtained in terms of experiment and numerical simulation is performed.

G8-20. Mitov Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Digital cascade pressure and position regulator for electrohydraulic steering system*, Scientific Conference of "Angel Kanchev" University of Ruse 2016, Ruse, Proceedings, ISSN 1311-3321, pp.183÷189, 2016.

Abstract: The work is carried out design and synthesis of the structure of a digital cascade controller with feedback on pressure and position of electrohydraulic steering system. Developed software implementation based on which it is embedded into the microcontroller for mobile applications. An empirical tuning of the regulator in terms of real experiment on steering electrohydraulic drive system with digital control is filled. The experimental research and analysis of the behavior of the studied system with embedded regulator were performed.

G8-21. Mitov Al., Il. Angelov, J. Krlev, *Investigation and analysis of existing schematic designs of electrohydraulic control module for digital control of hydraulic steering devices*, International Scientific Conference "Machine Science", Sliven, Journal of Thermotechnics, ISSN 1314-2550, pp.24÷29, 2017.

Abstract: The paper presents investigation of existing schematic design of conventional hydraulic steering units as well as embedded in them electrohydraulic control modules supporting capability for digital control. The paper generalizes the advantages and disadvantages of hydraulic steering systems with conventional hydro-mechanical control and digital electrohydraulic control. The paper also presents a specific electrohydraulic control module (PVE) and its mathematical model providing a basis for following investigation of the module behavior in numerical simulation.

G8-22. Mitov Al., J. Krlev, Il. Angelov, *Modeling in Simulink environment of electrohydraulic control unit for digital control of hydraulic steering devices*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2017", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, Issue 2, pp.77÷86, 2017.

Abstract: Based on the research, analysis and mathematical modelling of a particular type of electrohydraulic control module (PVE) for digital control of hydraulic steering unit (HSU), the present work presents the realization of the mathematical model in an environment of Simulink®. An optimal tuning of a embedded PID controller has been made. The results of the response of a module controlled by a hydraulic proportional spool valve are presented.

G8-23. Mitov, Al., J. Krlev, Il. Angelov, Ts. Slavov, *Identification and synthesis of linear-quadratic regulator for digital control of electrohydraulic steering system*, 11th International Fluid Power Conference, 11thIFK`2018, ISBN 978-3-9816480-1-0, Aachen, Germany, 2018.

Abstract: The paper presents an optimal reference tracking algorithm for electrohydraulic steering systems which is based on multivariable system identification, linear quadratic control and Kalman filtering for state estimation. A laboratory test-bench composed of electrohydraulic-steering unit (EHSU), steering cylinder, 32-bit microcontroller, steering

wheel and joystick supports experimental work. Traditional approach for reference tracking in steering usually is based on classical control algorithms such digital PI regulator or non-digital hydro-mechanical feedback. In contrast the control theory suggests advanced control techniques, which can take into account multivariable nature of the process. In this way a higher closed-loop performance can be achieved.

G8-24. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov, *Multivariable quadratic cost control of electrohydraulic steering system*, International Conference Automatics`2018, Sozopol, Proceedings of the Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, Vol. 68, Issue 2, pp.242÷254, 2018.

Abstract: In the paper is presented an approach for design of multivariable control system for electrohydraulic steering device. It is based on identification of a multivariate model, quadratic cost functional and state estimation. Experimentation is conveyed on laboratory test-bench which is composed of hydraulic cylinder, microcontroller and hydraulic transmission.

G8-25. Angelov, Il. Al. Mitov, J. Krlev. *Test Bench for Investigation of Load-Sensing Electrohydraulic Steering System*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2018", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, pp. 319÷326, 2018.

Abstract: The work presents a schematic solution, equipment and realization of a test bench for investigation of electrohydraulic steering system with sensitivity to change the external load (load-sensing) on executive servo cylinder. The hydraulic drive system of the bench consists mainly of: variable displacement axial-piston pump with a pressure controller, a conventional hydraulic steering unit, a hydraulic control block for steering systems for various of modes of operation and a double acting servo cylinder. Primary experimental results from putting into operation and selecting a suitable bench control system are shown.

G8-26. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov. *Embedded H^∞ controller of electrohydraulic control module for digital control of electrohydraulic steering systems*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2018", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, pp. 327÷335, 2018.

Abstract: An optimal reference tracking algorithm of servo-cylinder position in electrohydraulic steering system is presented, which is obtained by H^∞ synthesis based on multivariable system identification. Experimental studies were performed on a laboratory test bench for steering device of mobile machinery. The state-of-the-art advanced control method allows for higher closed-loop performance compared to the classical PID methods.

G8-27. Angelov, Il. N. Stanchev, Al. Mitov. *Test bench for experimental research of an electrohydraulic closed-loop control systems with displacement volume control of the actuator speed*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines "PEPM – 2018", Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, pp. 336÷343, 2018.

Abstract: This article presents the design regarding the hydraulic diagram, the synthesis of the main hydraulic and constructive parameters and arrangement of functional test bench stand of an electrohydraulic closed-loop control systems of different types of hydraulic cylinders or hydraulic motors and different methods for research experimental work.

G8-28. Mitov, Al., Ts. Slavov, J. Krlev, Il. Angelov, *Investigation of robust stability of electro-hydraulic control module for hydraulic steering system with linear-quadratic regulator*, Scientific Conference of "Angel Kanchev" University of Ruse 2018, Ruse, Proceedings, ISSN 1311-3321, 2018.

Abstract: The paper investigates the robust stability of an embedded robust controller for optimal reference tracking of electrohydraulic steering systems. The regulator is synthesized on the base of multivariable system identification and quadratic cost function. A *Kalman* filtering algorithm is used for the state estimation. In order to describe the system in

robust control framework we introduce a small uncertain element into the model from identification in the form of input multiplicative uncertainty. Then the system is represented as a $M - \Delta$ interconnection which allows to calculate the structured singular value (μ) of the closed loop system with the linear quadratic regulator. This singular value is a measure of the loop stability in presence of bounded variations in the model characteristics in frequency domain or in its parameters. Therefore the present paper proves that the closed-loop system keeps its stability in presence of unmodelled dynamic effects caused for example by the inherent nonlinearities in the hydraulic steering units.

G8-29. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Robust stability of h-infinity regulator for electro-hydraulic steering units*, International Conference Automatics`2018, Sozopol, Proceedings of the Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, Vol. 69, Issue 2, pp.325÷334, 2019.

Abstract: The paper is focused on investigation of robust properties of an developed robust controller for programmed reference tracking of electrohydraulic steering units. The regulator is designed on the base of identified single input multiple output model and H-infinity optimization procedure. The system is further described in robust set-ting by addition of parameter uncertainty into some of the model parameters. The present paper explains that the closed loop system keeps its stability in presence of input multiplicative uncertainty related to some nonlinear actuator effects which are inherent in most of the hydraulic steering units. The performance of the H-infinity regulator is experimentally verified on a laboratory test bench.

G8-30. Angelov, Il., Al. Mitov, P. Kyorgogov, *Switch control algorithm of hydrostatic power transmission applied to wind turbines*, National Forum „Days of Mechanics“, 23rd National seminar of mechanics of continuous environments, IHS “Fr. J. Curie”, r. c. “St. St. Constantine and Helena”, Varna, 2019, Journal of Mechanics of Machines, Vol. 124, Issue 1, ISSN 0861-9727, pp.75÷80, 2020.

Abstract: The article presents a control algorithm for stepless switching of hydraulic motors to a hydrostatic transmission designed to transfer mechanical energy from a wind turbine to an electric generator. The developed hydraulic scheme of a laboratory setup for the experimental study of hydrostatic transmission suitable for use in power systems with power up to 200 kW is shown. The basis of the control algorithm is combinatorial depending on parallel operation of hydraulic motors in the transmission depending on their displacement volume. This enables the synthesis of this kind of energy conversion systems depending on the basic energy parameters of both the hydrostatic transmission and the power generator.

G8-31. Mitov, Al., J. Krlev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Design of robust μ -controller in electrohydraulic control module for digital control of electrohydraulic steering systems*, Scientific Conference on Power Engineering and Power Machines “PEPM – 2019”, Sozopol, ISSN 1314-5371, Proceedings, pp.299÷309, 2019.

Abstract: The focus is on developing a robust embedded mu-regulator of electrohydraulic control module for the digital control of hydraulic steering systems. The experimental studies were performed on a laboratory bench for investigation of electrohydraulic steering systems for low-speed mobile machines. The controller development begins from a previously identified multivariable LTI state-space model. Uncertain components are also present in the model to account for nonlinear effects. Then the system is represented in appropriate form for robust controller design. The closed-loop structured singular value (μ) is minimized with a $D - K$ iterative algorithm in order to achieve the robust stability and performance of the electrohydraulic system.

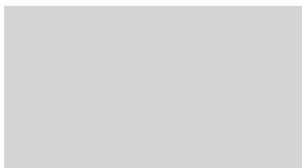
G8-32. Mitov, Al., J. Kralev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Robust stability investigation of LQG and H_∞ controllers for electrohydraulic steering control system*, International scientific conference “75 years of union of scientists in Bulgaria – use of science and education”, International House of Scientists “Frederick Joliot-Curie”, “St. St Konstantin and Elena” resort, Varna, Proceedings, ISBN 978-954-397-045-2, pp.222÷228, 2019.

Abstract: The paper present a comparison of the robust stability of two embedded controllers intended for application in electrohydraulic steering systems - linear-quadratic *Gaussian* (LQG) controller and H_∞ controller. Both controllers are synthesized on the base of state-space system model obtained by identification procedure. To investigate robust stability of the closed-loop system 30% parametric uncertainty is introduced into B matrix of the model which describes the observed dead-band of the electrohydraulic proportional spool valve. The closed-loop system is represented as $M - \Delta$ interconnection which allows calculation of its structured singular value (μ) with both controllers. The H_∞ controller achieves smaller singular value than the LQG controller which asserts that loop stability in presence of bounded variations in the model characteristics is increased in the case of H_∞ controller. The performance of both controllers is experimentally verified on laboratory test bench.

G8-33. Mitov, Al., J. Kralev, Ts. Slavov, Il. Angelov, *Laboratory setup for investigation of control system for electrohydraulic steering units*, International Conference Automatics`2020, Sozopol, Proceedings of the Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829, Vol. 70, Issue 4, pp.67÷76, 2020.

Abstract: In this paper the developed experimental setup for investigation of electrohydraulic steering units (EHSU) is presented. The workability of designed by authors system for control of electrohydraulic steering with H_∞ controller is investigated. In comparison with other similar control systems, the presented one uses additional feedback signal from sensor for position of proportional spool valve (LVDT) integrated in EHSU. This feedback allows to achieve better performance of control systems. The design of H_∞ controller is done by solving mixed sensitivity optimization problem. The plant model used in controller synthesis is multivariable model with three outputs and one input. This model is obtained by identification procedure. The presented experimental results show workability of developed system.

17.02.2021
Sofia


Signature:.....
/Assist. Prof. Eng. Alexander Mitov, Ph.D./