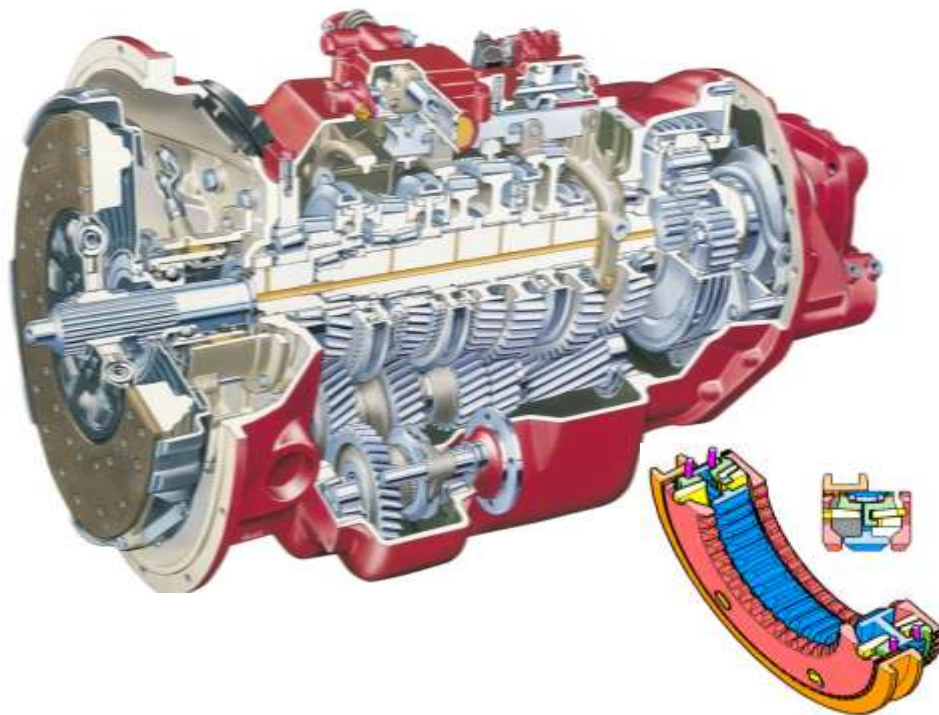


Robust och optimerad synkronisering av växellådor

Publik rapport



FFI 2014:12

FFI Fordonsstrategisk Forskning och Innovation	 VINNOVA	 Energimyndigheten	 TRAFIKVERKET
	 PAG		

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	5
5 Mål	6
6 Resultat och måluppfyllelse	6
7 Spridning och publicering	8
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	8
7.2 Publikationer.....	9
8 Slutsatser och fortsatt forskning	10
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	10

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

KTH och Scania har fokuserat på att skapa kunskap om vad som begränsar funktionstillförlitlighet och livslängd hos synkroniseringssystemet i moderna växellådor för tunga lastbilar. För detta ändamål har modeller och provningsmetoder utvecklats och använts. Resultat från komplexa FEM-simuleringar och riggprov har använts för att ge en djup förståelse över de mekanismer och lokala effekter som begränsar ett synkroniseringssystemets funktionstillförlitlighet och livslängd, vilket är av kritisk betydelse för att säkerställa en mycket hög tillgänglighet och en precis farthållning och en god förarkomfort. Förutom den kunskap som har skapats i projektet, har nya provnings metoder och virtuella modeller som möjliggör framtida modellbaserad och simuleringsdriven utveckling av nya drivlinelösningar.

Chalmers forskning fokuserades på utveckling av meta-modeller för dynamisk analys och inom ett ramverk för Pareto-optimering utvärdera synkroniseringssystemet. Constrained Lagrangian Formalism baserad matematiska meta-modell av generisk synkronisering system har utvecklats. Den etablerad modell beskriver alla olika delsteg i synkroniseringsförloppet. Utifrån den matematiska modellen har två specifika beräkningsmodeller realiserats (Scania huvudsynk och Volvo splitsynk). De specifika beräkningsmodellerna har validerats mot tillgängliggjord provdata från Scania och Volvo.

En grundläggande avvägning som måste göras är att kortad synkroniseringstid leder till större friktionskrafter som ökar slitaget och därmed riskerar att minska livslängden. Parameterstudier har gjorts som visar avvägning mellan konvinkel, konfriktion och synkroniseringstid för generisk modell. Parameterstudier har också gjorts som visar avvägning mellan anläggningskraft och synkroniseringstid för generisk modell. Formulering, lösning och analys har gjorts av Pareto-optimeringsproblem gällande avvägning mellan tid för synkronisering och växlingskvalitet (kvantifierat i form av skillnadsvarvtal vid ingrepp). Mängden Pareto-optimala designparameterar kan visa hur denna avvägning ser ut i en given designsituation.

2 Executive summary in English

KTH och Scania have focused on creating knowledge on phenomena and design properties that limit the functionality and life of synchronisation systems in heavy trucks. Models and physical test methods have been developed and used as primary means to create the new knowledg. Results from complex FEM simulations and rig tests have been used to provide a deep understanding of the mechanisms and local effects that limit the reliability and lifetime of a synchronization system, which is critical to ensuring very high availability and precise cruise control and good driver comfort. In addition to the knowledge created in the project, deliverables are new test methods and virtual models that enable future model-based and simulation-driven development of new propulsion solutions.

Chalmers' research is focused on the development of meta-models for dynamic analysis of synchronizer mechanisms and within a framework of Pareto optimization evaluate the synchronization systems. Constrained Lagrangian formalism based mathematical model of the generic synchronization system has been developed. The established model describes all the different sub-phases in the synchronization process. Based on the developed mathematical model two specific computational models have been realized (Scania master sync and Volvo split sync). The specific computational models have been validated against available experimental data from Scania and Volvo.

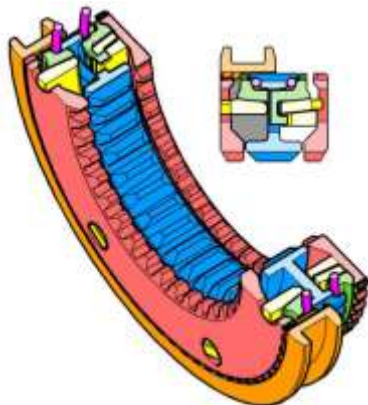
A fundamental trade-off that must be made is that the shortened synchronization leads to

greater friction forces increases wear and thus reduces life expectancy. Parametric studies have been done that show balance between the cone angle, cone friction, other design parameters, and synchronization time and shift quality within the generic model of synchronization process. Parameter studies have also been done that show trade-off between shift force and synchronization time of the generic model. Formulation, solution and analysis have been made of several Pareto optimization problems using as objective functions the time synchronization and shift quality (quantified in terms of the speed difference at the engagement). The Pareto fronts and Pareto sets are obtained and shown how optimal design parameter can be chosen for quick and smooth synchronization processes.

3 Bakgrund

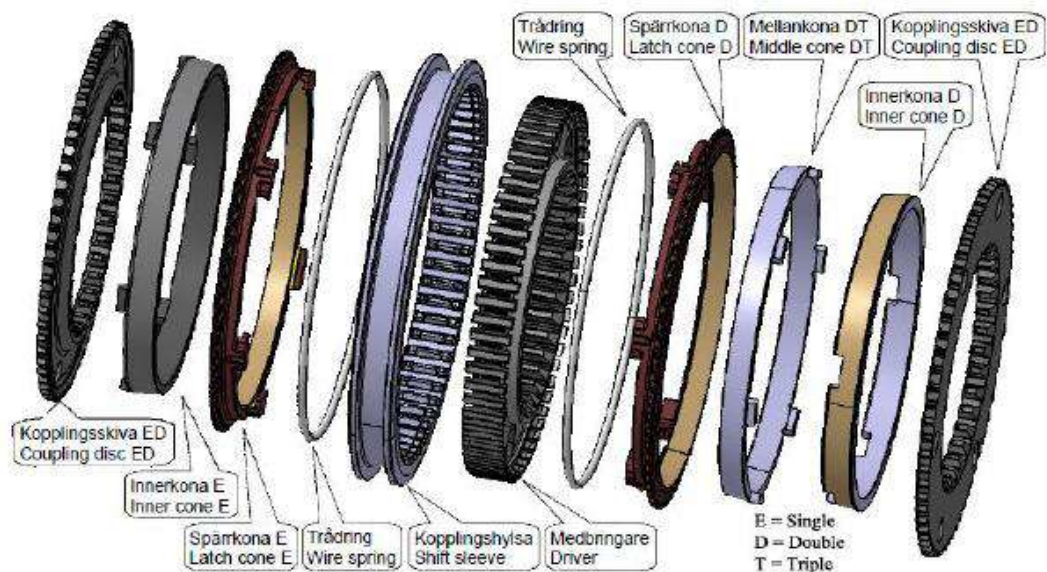
I Sverige arbetar mer än 5000 personer med produktion av komponenter till fordons-transmissioner till ett totalt produktvärde på ca 12 miljarder SEK per år. Av tillverkningskostnaden för en lastbil är ungefär en femtedel relaterad till transmissionen, som består av kugghjul, axlar, synkroniseringsringar, kopplingar mm. Transmissioner är, och har varit, ett nyckelsystem för svensk fordonsindustri där man har behållit både utveckling, konstruktion och forskning och även produktion kvar i Sverige. Gällande motorer och transmissioner för tunga fordon sker mellan 10 – 20 % av världsproduktionen i ett område som sträcker sig från Göteborg till Stockholm.

Kugghjul är huvudkomponenter i mekaniska transmissioner och synkroniseringsystemet (se figur 2) spelar en vital roll för transmissionens prestanda och för hela drivlinans kvalitet.



Figur 2. Synkroniseringssystem

Växellådan har ett mycket komplext beteende och den innehåller bland annat högt belastade synkroniseringskomponenter (se figur 3) som skall möjliggöra korta växlingstider och kontrollerade växlingskrafter under hela sin livslängd. De skall alltså inte enbart vara optimerade för sin funktion utan även okänsliga för naturliga variationer i form av tillverkningstoleranser, spridning i materialegenskaper, individuellt körsätt och typ av transport. För att möjliggöra korta växlingstider och en jämn växlingskvalitet under växellådans hela livslängd, måste dess okänslighet för naturliga variationer, dvs. robusthet, även innefatta en robusthet gentemot de förändringar av kontaktyornas egenskaper som uppkommer vid varje synkronisering. Synkroniseringens prestanda beror av kontaktyornas form, yttopografi, och materialegenskaper, samt bestäms även av oljans egenskaper. Växlingskvalitet kan indelas i en inre kvalitet, som kan kvantifieras som den impuls som uppstår vid varje växling, och en yttre interaktiv kvalitet, som är den kraft och rörelse i växelspak (för en mekanisk växellåda) som upplevs av föraren. Både den inre och den yttre växlingskvaliteten bör vara optimal och konstant under växellådans hela livstid.



Figur 3. Synkroniseringskomponenter

För att möta framtidens mycket starka behov att öka totalverkningsgraden, dvs. att minska bränsleförbrukningen för förbränningsmotorer strävar man efter att låta motorn arbeta under så gynnsamma förhållanden som möjligt med avseende på moment och varvtal. Det leder till ökade påfrestningar på växellådans synkroniseringsystem som dels utsätts för större krafter och effekter på grund av behov av snabbare växling, och dels fler synkroniseringsförlopp under växellådans livslängd på grund av mera frekvent växling. För att möta detta krav, så måste synkroniseringsystemets komponenter förbättras och synkroniseringsprocessen måste regleras mer effektivt. För att möjliggöra en mer effektiv reglering måste en djup förståelse för de komplexa interaktionerna mellan ingående komponenterna byggas upp.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet med projektet är att möjliggöra simuleringsdriven utveckling av växellådssynkronisering. En doktorand på KTH/Scania fokuserar på kontakten mellan synkroniseringsystemets konor för att bedöma belastning på dessa. En doktorand på Chalmers fokuserar på synkronisering ur ett växellåds- och fordonsperspektiv för att bedöma effekten av interaktioner med kringliggande komponenter på växlingstid och funktionssäkerhet.

Forskningsfrågorna att besvara är:

- Hur kan kontaktytans beteende in en synkroniseringsenhet förutspås under försynkroniseringsfasen samt synkroniseringsfasen?
Denna forskningsfråga är nedbruten till:
 - Hur kan friktionsbeteendet i övergången mellan försynkroniseringsfasen och synkroniseringsfasen förutspås?
 - Hur beror friktionstalet i kontaktytan på olika belastningsparametrar, och hur kan det modelleras?
 - Hur beror den lokala kontaktrycksfördelningen samt lokala kontaktemperaturen på olika belastningsparametrar samt konutformningar?
 - Hur kan termomekaniska synkroniseringsmodeller valideras?
- Vilken belastningsparameter beskriver bäst hårdvaruhaveri för molybdenbelagda synkroniseringskonor, samt hur kopplar antalet cykler på olika belastningsnivåer till total livslängd på artiklarna?
- Kan data tillgänglig i växellådans styrsystem användas för att bedöma risken för hårdvaruhaveri på synkroniseringsenheter?

- Finns det någon matematisk modell för att studera växlingsprocessen? Går det förstå de komplexa rörelserna av artiklarna i synkroniseringsenheten, och går de att beskriva de krafter som uppstår när artiklarna interagerar med varandra.
- Vilka relevanta målfunktioner finns det för optimering av synkroniseringssystem?
- Vilka geometriska- och belastningsparametrar påverkar synkroniseringsprocessen?
- Hur kan resultatet från optimeringsstudier av synkroniseringssystem användas?
- Är dessa modeller tillräckligt flexibla och generella för att utvidga forskningen genom att inkludera fler drivlinesystem och dess påverkan på synkroniseringen, eller genom djupare komponentstudier i själva synkroniseringssystemet?

Metoderna som använts inkluderar fysik provning, flödessimuleringar, termomekaniska simuleringar och stelkroppssimuleringar.

5 Mål

Det övergripande målet med projektet är att:

- Ta fram ny kunskap och optimera synkroniseringssystem i mekaniska transmissioner med avseende på livslängd, robusthet, energiförbrukning och växlingskvalitet.

Huvudmålet har vidare brutits ned till delmålen:

- Öka synkroniseringssystemets livslängd och hålla dess egenskaper så konstanta som möjligt under växellådans livslängd, utan att växlingskvaliteten försämras.

- Minimera förändringen av synkroniseringskonornas prestanda under deras livslängd.

- Utveckla ett datorbaserat verktyg för att snabbt och effektivt kunna utvärdera nya koncept för synkroniseringssystem i konceptutvecklingsfasen

- Utbilda ingenjörer till teknologie doktorer inom design av effektiva transmissionssystem

6 Resultat och måluppfyllelse

- Grundläggande ytskadestudier har utförts. Kopplat till de studier som utförts. Det står nu fullt klart att den dimensionerande parametern är den maximala kontakttemperaturen, inte storleken på friktionseffekten eller den rörelseenergi som skall synkroniseras, i kontaktytan under synkroniseringsprocessen.
- Kunskap om hur förspänning, form på synkroniseringsytorna, samt storlek, riktning och fördelning av evakueringskanaler i konytorna påverkar försynkroniseringstiden, har skapats, presenterats för det svenska transmissionsklustret och publicerats internationellt.
- En provningsrigg för att mäta kraft- förskjutningssamband vid försynkronisering har tagits fram för att validera resultaten från de modeller som tagits fram för att simulera försynkroniseringsfasen.
- En termomekanisk finita-element (FE) modell för att simulera och prediktera det transienta kontakttillståndet under en synkronisering har utvecklats och validerats med prestandamätningar i Scantias provrigg. Modellen har givit god insikt om hur instabilt kontakttillståndet under en synkronisering är, samt hur det detaljerade termomekaniska kontakttillståndet för ett synkroniseringssystem beror av materialegenskaper hos synkroniseringsparet, val av ytbeläggning och dess egenskaper, form och formavvikelse hos synkroniseringsytorna, samt smörjoljans egenskaper påverkar kontaktryck, yttemperatur och friktionsbeteendet under en synkroniseringssekvens
- En matematisk modell för friktionsbeteendet under en synkroniseringssekvens har tagits fram genom integration av resultat från ett stort antal prov i Scantias synkroniseringsrigg, med simulerade resultat för det lokala (höggradigt icke-linjära och termomekaniska)

kontaktbetendet under synkronisering. Modellen har validerats och är direkt användningsbar den systemdemonstrator, som tagits fram av Chalmers

- En validerad modell för friktionsbetendets variation under en synkronisering har tagits fram och publicerats i en vetenskaplig tidskrift. Modellen har använts för att prediktera förändringar av synkroniseringsprestanda, och livslängd, som funktion av antalet växlingar. Resultaten har validerats med provning i synkroniseringsriggen, och en metod för realtidssimulering av synkroniseringsprocessen identifiera risk för funktionsbortfall har utvecklats. Modellen och kunskapen som skapats är implementerbar i reglermjukvaran för aktuella växellådor,
- En ny metodik har varit föreslagit för synkroniseringssystem modell utveckling som baseras på Constrained Lagrangian Formalism (CLF) i syfte att beskriva den med stelkroppsdyamik, kontaktmekanik, friktion samt randvillkor motsvarande synkronisering processer i växellådor.
- CLF baserad matematiska meta-modell av generisk synkronisering system har utvecklats. Den etablerad modell beskriver alla olika delsteg i synkroniseringsförloppet. Utifrån den matematiska modellen har två specifika beräkningsmodeller realiserats (Scania huvudsynk och Volvo splitsynk). De specifika beräkningsmodellerna har validerats mot tillgängliggjord provdata från Scania och Volvo.
- Parameterstudier har gjorts som visar avvägning mellan konvinkel, konfriktion och synkroniseringstid för generisk modell. Parameterstudier har också gjorts som visar avvägning mellan anläggningskraft och synkroniseringstid för generisk modell.
- Formulering, lösning och analys har gjorts av Pareto-optimeringsproblem gällande avvägning mellan tid för synkronisering och växlingskvalitet (kvantifierat i form av skillnadsvarvtal vid ingrepp).
- Även den analytiska lösningen av det tid-komfort Pareto optimal kontroll problem för den generiska synkroniseringsmekanismen verkar på steady-state dynamiken på huvudfasen av synkronisering har erhållits och analyseras.
- Simulering och analys av synkroniseringsprocesser med hänsyn till dynamiken i pneumatiskt ställdon och friktionsmodell som utvecklats vid Scania har gjorts.
- Utvecklade metoder för synkroniseringsmekanism modellering, optimering och känslighetsanalys av växlingstid och växlings kvalitet har implementerad i Matlab baserad virtuell demonstrator.
- Projektet har leverat två licentiatexamina: på D. Häggström, "On synchronization of heavy truck transmissions", Institutionen för Maskinkonstruktion, KTH, Stockholm, 2016, och M. Irfan, "Modelling and optimization of gear shifting mechanism: Application to heavy vehicles transmission systems", Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2017.

7 Spridning och publicering

Chalmers har presenterat projekt resultaten på de följande internationella konferenser:

1. *The ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015*, Barcelona, June 29 – July 2, 2015.
2. *The ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers & Information in Engineering Conference IDETC/CIE*, Boston, Massachusetts, USA. August 2-5, 2015.
3. *The International Conference on Engineering Vibration*, Ljubljana, 7 - 10 September 2015.
4. *The IMAC-XXXIV Conference & Exposition on Structural Dynamics*, Orlando, Florida, January 25-28, 2016.

KTH och Scania har presenterat projektresultat vid följande internationella konferenser och vetenskapliga tidskrifter:

5. *International Gear Conference*, Lyon, France, August 26-28 2014.
6. *15th Internationaler VDI Congress – Drivetrain for Commercial Vehicles 2015*, June 16-17, Friedrichshafen, Germany
7. *20th International Colloquium: Tribology – Industrial and automotive lubrication*, Stuttgart, Tyskland, Januari 12-14, 2016.
8. *ASME 2015 Power Transmission and Gearing Conference*, Boston, USA, August 2-5 2015.
9. *Tribology International*, Volume 97, 2016.
10. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017.

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Ökad kunskap inom området och bidragit till ökat samarbete inom industrin och forskning.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Projektet fort skrider inom Transmissionsklustret, medverkande: Scania, Volvo, Chalmers och KTH.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Som fördjupad kunskap.
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

KTHs projektpublikationer

1. **Häggström D., Sellgren U., Björklund S.**, (2014) “*Robust pre-synchronization in heavy truck transmissions*”. International Gear Conference, August 26-28 2014, Lyon, France.
2. **Häggström D., Wiktor Stenström, Ulf Sellgren, Stefan Björklund**, (2015) “*Parameter study of the thermomechanical performance of heavy duty synchronizers*”. 15th Internationaler VDI Congress – Drivetrain for Commercial Vehicles 2015, June 16-17, Friedrichshafen, Germany.
3. **Häggström D., Stenström W., Sellgren U., Björklund, S.**, (2015) “*A verified and validated model for simulation-driven design of heavy duty truck synchronizers*”, 20th International Colloquium: Tribology – Industrial and automotive lubrication, Januari 12-14, Stuttgart, Tyskland.
4. **Häggström D., Nyman P., Sellgren U., Björklund S.**, (2017). “*Predicting friction in synchronizer systems*”. Tribology International.
5. **Häggström D.**, (2016) “*On synchronization of heavy truck transmissions*”, Licentiate Thesis, Department of Machine Design, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

Chalmers projektpublikationer

6. **Berbyuk, V.**, (2015), “Dynamics of synchronization of rotational motion of contacting triple-body systems”, *Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015*, Barcelona, June 29 – July 2, 2015, Universitat Politècnica de Catalunya, Josep M. Font-Llagunes (Ed.) p. 532-541.
7. **Berbyuk, V.**, (2015), “Towards Pareto optimization of performance of a generic synchronizer of transmission systems”, *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers & Information in Engineering Conference IDETC/CIE*, August 2-5, 2015, Boston, Massachusetts, USA, paper DETC2015-46773
8. **Irfan, M., Berbyuk, V., and H. Johansson**, (2015), “Modelling of heavy vehicle transmission synchronizer using constrained Lagrangian formalism”, *In Proc. of the International Conference on Engineering Vibration*, Ljubljana, 7 - 10 September ; [editors Miha Boltežar, Janko Slavič, Marian Wiercigroch]. - EBook. - Ljubljana: Faculty for Mechanical Engineering, 2015 p. 28-37.
9. **Irfan, M., Berbyuk, V., Johansson, H.**, (2016), “Dynamics and Pareto Optimization of a Generic Synchronizer Mechanism”, in *Rotating Machinery, Hybrid Test Methods, Vibro-Acoustic & Laser Vibrometry*, Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2016, Editors James De Clerck and David S. Epp, Volume 8, pp. 417-425, 2016, Springer, ISBN: 978-3-319-30084-9, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-30084-9_38
10. **Irfan, M.**, “*Modelling and optimization of gear shifting mechanism: Application to heavy vehicles transmission systems*”, Lic. Eng. thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2017.
11. **Irfan, M., Berbyuk, V., Johansson, H.**, (2017), “Performance improvement of a transmission synchronizer via sensitivity analysis and Pareto optimization”, *Journal paper submitted for international publication*.

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Det har visats att termomekaniska simuleringar kan bedöma yttemperaturen i kontaktytan väl. Yttemperaturen har visat sig beskriva början till då allvarliga hårdvaruskador uppträder bättre än de traditionella parametrarna specifik yteffekt och specifik synkroniseringsenergi. Friktionstalet vid övergången mellan försynkronisering och synkronisering kan till viss del utvärderas med flödessimuleringar. En effektiv modell för friktionstalet under själva synkroniseringen som funktion av olika belastningsparametrar har utvecklats.

Det har visats att Constrained Lagrangian Formalism (CLF) är en lämplig metod för att representera växellådssynkronisering, vilket visas genom validering mot fysisk provning. Växlingsförloppet bryts ner i olika faser, där varje fas kan ersättas av valfri matematisk modell. Den nyligen utvecklade friktionsmodellen för synkroniseringsfasen har implementerats. Som målfunktion för optimeringen används synkroniseringstid (prestanda) och kvarvarande varvtalsfel (komfort, risk för hårdvaruskador).

Fortsatt forskning inkluderar att utöka de termomekaniska simuleringarna till kolfiberbelagda synkroniseringskonor, samt utvärdera när hårdvaruskador/haverier uppstår på dessa och hur tillverkningstoleranser påverkar dessa förlopp. Det kommer även att undersökas hur tiden för försynkroniseringsfasen kan minskas.

Då den gemensamma fortsättningsansökan ej godkändes kommer Scania och KTH fortsätta med sitt samarbete, och Chalmers och Volvo fortsätta med sitt samarbete. Inget gemensamt samarbete mellan de fyra parterna planeras.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Scania CV Aktiebolag

Orgnr: 560884-0976

Scania CV AB

151 87 Södertälje

Kenth Hellström

Daniel Häggström

Volvo Lastvagnar AB

Orgnr: 556013-9700

Avd 26601 AB4S

405 08 Göteborg

Magnus Andersson

Chalmers Tekniska Högskola AB, Institutionen för tillämpad mekanik

Orgnr: 556479-5598

Hörsalsvägen 7

412 96 Göteborg

Victor Berbuyk

Håkan Johansson

Irfan Muhammad

Kungliga tekniska högskolan, Institutionen Maskinkonstruktion

Orgnr: 202100-3054

KTH

100 44 Stockholm

Ulf Sellgren

Stefan Björklund