

Joel Raunisto

# SÄHKÖHYDRAULISET TOIMILAITTEET TYÖKONEISSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Petteri Multanen  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Joel Raunisto: Sähköhydrauliset toimilaitteet työkoneissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto ohjelma, Automaatiotekniikka  
Huhtikuu 2023

---

Energian ja polttoaineiden hinnan noustessa työkoneiden energiatehokkuus on noussut työkonevalmistajien näkökulmasta entistä tärkeämmäksi asiaksi. Tällä hetkellä työkoneiden suurimmat ympäristövaikutukset tulevat polttomoottorien käytön aikana tuottamista hiilidioksidipäästöistä. Lisäksi polttomoottoreiden yleisesti tiukentuneet päästörajoitukset sekä perinteisten hydraulijärjestelmien matala hyötysuhde ovat kannustaneet tutkijoita kehittämään uusia ratkaisuita työkoneiden hyötysuhteen nostamiseksi. Erilaiset työkoneiden sähköistämismuodot ovat nostaneet suosiotaan viime aikoina ja esimerkiksi sähköhydrauliset toimilaitteet ovat nousseet esille yhtenä potentiaalisena ratkaisuna. Sähköhydraulisten toimilaitteiden tarjoamat ominaisuudet, kuten toimilaitteen voimantuotto ja ohjattavuus mahdollistavat energia- tehokkaiden järjestelmien käytön myös työkoneissa.

Työssä tehtiin kirjallisuusselvitys sähköhydraulisista toimilaitteista ja tarkasteltiin erilaisia sähköhydraulisia toimilaiteratkaisuita työkoneissa. Kirjallisuusselvityksessä apuna käytettiin muun muassa tieteellisistä artikkeleista ja julkaisuista sekä muista kirjallisuuslähteistä peräisin olevaa tietoa. Työssä käsiteltiin sähköhydraulisten toimilaittejärjestelmien tarjoamia hyötyjä sekä haasteita, joita työkonekäytössä muodostuu. Työssä koottiin yhteen tutkimustuloksia viimeisimmistä sähköhydraulisista toimilaiteratkaisuista, joita on jo työkonekäytössä tai joita voitaisiin soveltaa työkonekäyttöön.

Tietoa etsiessä ja analysoidessa havaittiin, että monia erilaisia ratkaisuita työkoneiden sähköistämiseen ja hyötysuhteen nostamiseen muilla tavoin kuin sähköhydraulisilla toimilaitteilla löytyy paljon. Työn aiheeseen syvennyttiin huolellisesti, jotta löydettiin aineistoa, joka käsitteli sähköhydraulisia toimilaittejärjestelmiä työkonekäytössä. Aineisto ja lähteet analysoitiin tarkasti ja työhön valikoitiin esitettäväksi potentiaalisimmat uusimmat ratkaisut.

Tutkimustuloksista huomattiin, että työkoneiden sähköistämällä saavutettavat energiansäästöt voivat olla huomattavia perinteisiin hydraulijärjestelmiin verrattuna. Työkoneiden sähköistämiseen löytyy monia ratkaisuita ja julkaisuissa esitettiin esimerkiksi polttomoottorin korvaamista akustoilla ja sähkömoottoreilla sekä perinteisten hydraulisten toimilaitteiden korvaamista sähköhydraulisilla toimilaitteilla. Työssä käsiteltiin myös mahdollisia ratkaisuita sähköhydraulisten toimilaitteiden kustannuskysymyksiin, sillä tällä hetkellä työkoneiden varustaminen sähköhydraulisilla toimilaitteilla nostaa liikaa koneiden valmistuskustannuksia. Tämän seurauksena sähköhydrauliset toimilaitteet eivät ole vielä yleistyneet työkonekäyttöön.

Avainsanat: Sähköhydraulinen toimilaitte, EHA, työkone, sähköiset hydraulijärjestelmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. EHA: SÄHKÖHYDRAULISET TOIMILAITTEET .....	2
3. EHA MOBILEHYDRAULIIKASSA .....	5
3.1 Julkaisu 1: Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems.....	5
3.1.1 Raskaiden työkoneiden sähköistäminen .....	5
3.1.2 Tutkimuksen EHA-ratkaisut ja päätelmät .....	6
3.2 Julkaisu 2: A High-Efficient Solution for Electro-Hydraulic Actuators with Energy Regeneration Capability .....	10
3.2.1 Tutkimuksen pääkohdat ja tavoitteet.....	10
3.2.2 EHA-järjestelmät ja päätelmät.....	11
3.3 Julkaisu 3: Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators .....	16
3.3.1 Sähköiset hydraulijärjestelmät .....	16
3.3.2 Huomioita ja päätelmät .....	17
4. YHTEENVETO .....	19
LÄHTEET .....	20

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

EHA	Electro-hydraulic actuator - Sähköhydraulinen toimilaite
$A$	Männän pinta-ala
$n_{EM}$	Sähkömoottorin pyörimisnopeus
$Q_{Cyl}$	Sylinteriin menevä tilavuusvirta
$Q_{Pmp}$	Pumpun tilavuusvirta
$V_{Pmp}$	Pumpun kierrostilavuus
$v$	Sylinterin varren liikenopeus

# 1. JOHDANTO

Hydrauliset toimilaitteet ovat tärkeä osa liikkuvien työkoneneiden toimintaa ja energiatehokkuuden merkitys kasvaa jatkuvasti. Teollisuuden ja teknologian kehityksen vuoksi sähköhydrauliset toimilaitteet tekevät tuloaan liikkuviin työkoneneisiin. [1][2] Työn tavoitteena on antaa yleiskuva sähköhydraulisista toimilaitteista ja kertoa tarkemmin sähköhydraulisista toimilaitteista liikkuvissa työkoneneissa. Tämä kandidaatintyö keskittyy sähköhydraulisten toimilaitteiden tutkimiseen liikkuvissa työkoneneissa, mutta aihetta lähestytään tutkimalla sähköhydraulisia toimilaitteita myös yleisellä tasolla.

Toisessa luvussa tarkastellaan, mitä electro-hydraulic actuator eli sähköhydraulinen toimilaitte (EHA) yleisesti tarkoittaa ja esitellään millainen järjestelmä EHA on sekä mitä se sisältää. Luvussa tarkastellaan sähköhydraulisen toimilaitteen rakennetta niiden toiminnan ja teknisien ratkaisujen ymmärtämiseksi. Tämä antaa pohjan tarkempaan tutkimukseen työkoneneiden sähköhydraulisista toimilaitteista.

Kolmannessa luvussa esitellään sähköhydraulisia toimilaitteita liikkuvissa työkoneneissa käsitteleviä artikkeleita. Artikkelien avulla selvitetään, miten ja missä sähköhydraulisia toimilaitteita on käytetty liikkuvissa työkoneneissa ja minkälaisiin tuloksiin on päästy. Nämä julkaisut tarjoavat syvällisempää tietoa ja uusia näkökulmia sähköhydraulisten toimilaitteiden käytöstä ja kehittämisestä liikkuvissa työkoneneissa. Luvussa esitellään julkaisuja, joissa sähköhydraulisten toimilaitteiden kehitystä ja mahdollista käyttöä liikkuvissa työkoneneissa on tutkittu. Tutkimusten aiheet käsittelevät sähköistämisen tuomia energiasäästöjä sekä erilaisia ratkaisuita sähköhydraulisen toimilaittejärjestelmän toteuttamiseksi.

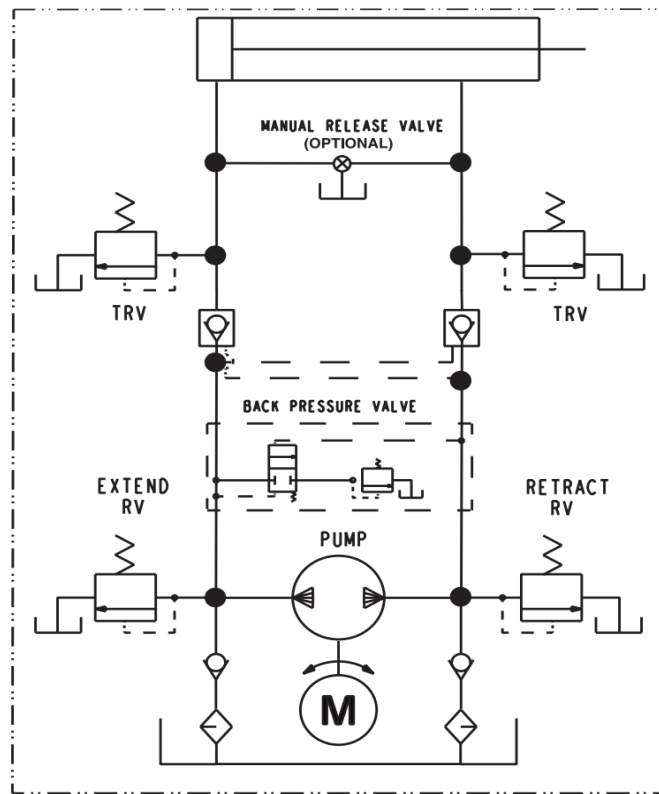
Lopuksi neljännessä luvussa kootaan yhteen työssä käsitellyt asiat. Yhteenvedossa kerrotaan kootusti sähköhydraulisten toimilaitteiden tuomat hyödyt ja haasteet sekä muita artikkeleista ja tutkimuksista selvinneitä seikkoja niiden nykytilanteesta ja tulevaisuudennäkymistä.

## 2. EHA: SÄHKÖHYDRAULISET TOIMILAITTEET

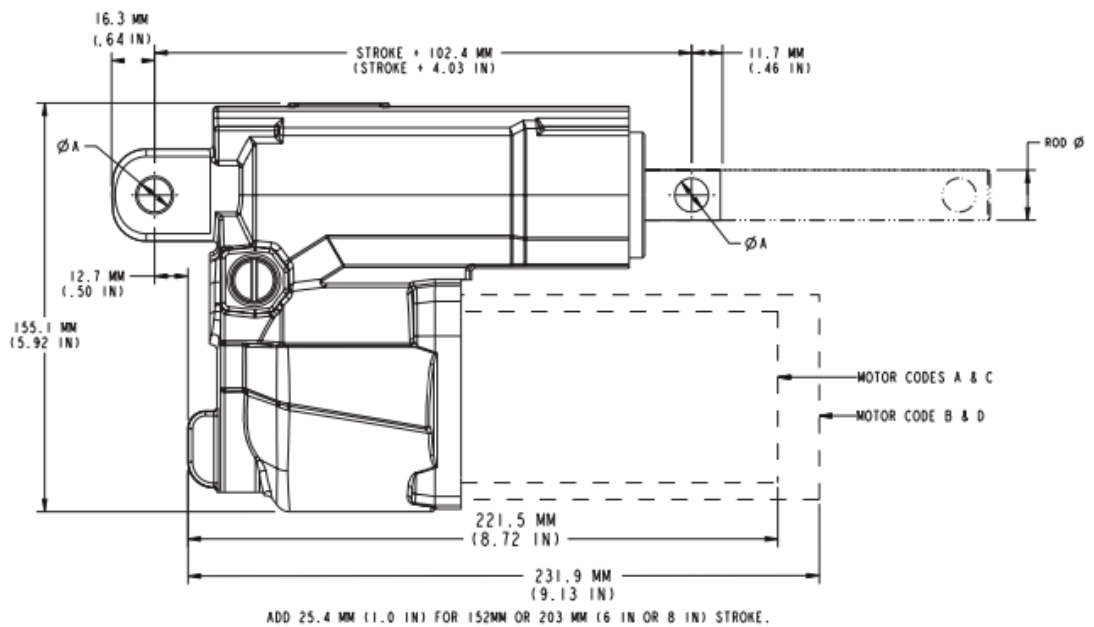
EHA:lla tarkoitetaan sähköhydraulista ja/tai sähköhydrostaattista toimilaitetta. Sähköhydraulinen toimilaite sisältää perinteiset hydraulikkajärjestelmän osat, mutta osat on yleensä integroitu toimilaitteen rakenteeseen. EHA ei siis tarvitse hydrauliletkuja tai erillisiä pumppuja toimiakseen. Hydrauliletkujen ja erillisten pumppujen pois jättäminen mahdollistaa yksinkertaisemman järjestelmätoteutuksen ja toimilaitteen sijoittaminen on joustavampaa. [2][3]

Sähköhydrauliset toimilaitteet on alun perin kehitetty lentokone-teollisuuteen, mutta käyttökohteet ovat laajentuneet tekniikan kehittyessä myös muihin hydraulikan teollisuuden tarpeisiin. Toimilaitteen komponentit voivat vaihdella eri järjestelmien välillä. Yksinkertaisuudessaan sähköhydraulinen toimilaite sisältää sähkömoottorin, hydraulipumpun, venttiileitä, toimilaitteen sekä nestesäiliön. [3][4]

Kuvassa 1 on esitetty esimerkkinä Parkerin sähköhydraulisen toimilaitteen hydraulikaavio, jossa on muun muassa paineenrajoitus- ja vastaventtiileitä, kaksisuuntainen sähkömoottori, kaksitoiminen pumppu, nestesäiliöt ja hydraulisylinteri. Kuvassa 2 on esitetty kuvan 1 hydraulikaavion mukainen sähköhydraulinen toimilaite.



**Kuva 1.** PARKER EHA -hydraulikaavio [5]



**Kuva 2.** PARKER EHA -mitat [5]

Sähköhydraulisilla toimilaitteilla on useita hyötyjä verrattuna perinteisiin hydraulisiin toimilaitteisiin. Näitä hyötyjä ovat muun muassa helpommin toteutettava ja joustavampi ohjaus, pie-

nemmät huoltotarpeet ja alhaisemmat käyttökustannukset. Energiatehokkuus on sähköhydraulinen toimilaittejärjestelmän yksi suurimmista hyödyistä perinteisiin hydraulijärjestelmiin verrattuna. [2][3][4]

Säädettävyyden ja tarkkuuden ansiosta EHA voidaan skaalata lähes mihin tahansa tarkoitukseen tai voiman tarpeeseen. Sähköhydraulisten toimilaitteiden käyttö mahdollistaa myös joustavampien suunnitteluratkaisuiden käytön, jolloin järjestelmästä voidaan luoda tehokkaampi ja yksityiskohtaisempi. Oman erillisen voimalähteen ansiosta niitä ei tarvitse sijoittaa tiettyyn paikkaan muiden komponenttien tai tietyn konfiguraation takia. Sähköhydrauliset toimilaitteet on myös helppoa ohjelmoida uusiksi, verkottaa ja diagnosoida. [3][4]

Yhtenä haasteena EHA:n käytön yleistymiseen on korkea hinta, erityisesti jos tarvitaan useita yksiköitä. Lisäksi sähköhydrauliset toimilaitteet eivät sovellu kaikkiin ympäristöihin, joissa perinteistä hydraulikkaa voidaan käyttää. Vaikka sähköhydraulisilla toimilaitteilla on etuja verrattuna perinteisiin järjestelmiin, niitä ei voida käyttää kaikissa tilanteissa, kuten syttyvien osien tai syttyvien päästöjen ympäristöissä. Lisäksi erittäin kuumat tai kylmät ympäristöt aiheuttavat haasteita sähköhydraulisten toimilaitteiden käytölle. Kuitenkin EHA:a voidaan käyttää myös haastavissa olosuhteissa, koska niissä on pienemmät riskit esimerkiksi vuodoille ja tukkeutumisille. Sähköhydrauliset toimilaitteet eivät vaadi erillisiä hydrauliletkuja keskitetyltä painelähteeltä toisin kuin monet perinteisten hydraulijärjestelmien toimilaitteet. [3][4][6]



## 3. EHA MOBILEHYDRAULIIKASSA

Työkoneiden energiatehokkuudesta ja sen parantamisen ratkaisuista on tehty monia tutkimuksia. Kirjallisuutta ja julkaisuja työkoneiden energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta löytyy paljon. Tutkielmaa tehdessä huomattiin, että kovin monet tutkimukset ja artikkelit eivät suoraan käsittele sähköhydraulisten toimilaitteiden käyttöä liikkuvissa työkoneissa. Useat kirjalliset julkaisut käsittelevät enemmänkin uusia teknologioita ja säätöratkaisuita, joita mahdollisesti voitaisiin hyödyntää myös työkonekäytössä tulevaisuudessa. Työn rajauksen vuoksi etsittiin erityisesti julkaisuja, jotka liittyvät sähköhydraulisten toimilaitteiden hyödyntämiseen liikkuvissa työkoneissa. Artikkeleissa esiteltiin myös muita työkoneiden sähköistämismuotoja, mutta työssä keskityttiin tarkemmin julkaisuiden sähköhydraulisia toimilaitteita käsitteleviin osuuksiin.

### 3.1 Julkaisu 1: Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems

Tämä alaluku käsittelee tutkimusta ”Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile machine implement systems”, jossa Fassbender et al. [1] esittävät raskaiden työkoneiden erilaisia sähköistämismetodeja, esimerkiksi rakennus-, maatalous-, metsätalous- ja kaivos-toiminnassa. Julkaisussa tuodaan esiin esimerkiksi sähkömoottoreiden hyödyntämistä ja sähkömoottorin säädettävyyteen perustuvia sähköhydraulisten toimilaitteiden ratkaisuja. Lisäksi julkaisussa käsitellään sähkömekaanisten pumppujen kombinaatioita sekä myös muita tapoja hyödyntää sähköisiä ratkaisuita raskaissa työkoneissa.

#### 3.1.1 Raskaiden työkoneiden sähköistäminen

Tavanomaiset hydraulikkajärjestelmät ovat työkoneissa pääasiassa venttiiliohjattuja ja ne kärsivät korkeista kuristushäviöistä. Nousevat energiakustannukset ja kiristyvät päästörajoitukset muodostavat perinteisille hydraulijärjestelmille ongelmia. Sähköhydrauliset toimilaitteet vaativat enemmän tilaa, niillä on rajoitettu kestävyys ja iskunsietokyky. Lisäksi sähköhydraulisten toimilaitteiden hinta tekee niistä sopimattomia moniin mobilehydrauliikan sovelluksiin. Työkoneiden sähköistämisestä saavutettavia hyötyjä ovat muun muassa päästöjen väheneminen, parempi suorituskyky ja sähköistämisen mahdollistamat erilaiset lähestymistavat.

Hydrauliikkapiirien ja keskitettyjen venttiiliohjauksien arkkitehtuuri ei ole edistyksellistä, mutta järjestelmät ovat helppoja toteuttaa käytännön tasolla. Uudenlaiset hajautetut järjestelmät voivat olla energiatehokkaampia, mutta ne ovat haastavampia toteuttaa raskaissa työkoneissa.

Sähkötoimisten pumppujen yhdistelmät ovat pääasiassa toteutettu standardikomponenteilla, kun taas erilaiset kustomoidut-, integroidut- ja lineaaripumput tarjoavat monia kehitysmahdollisuuksia.

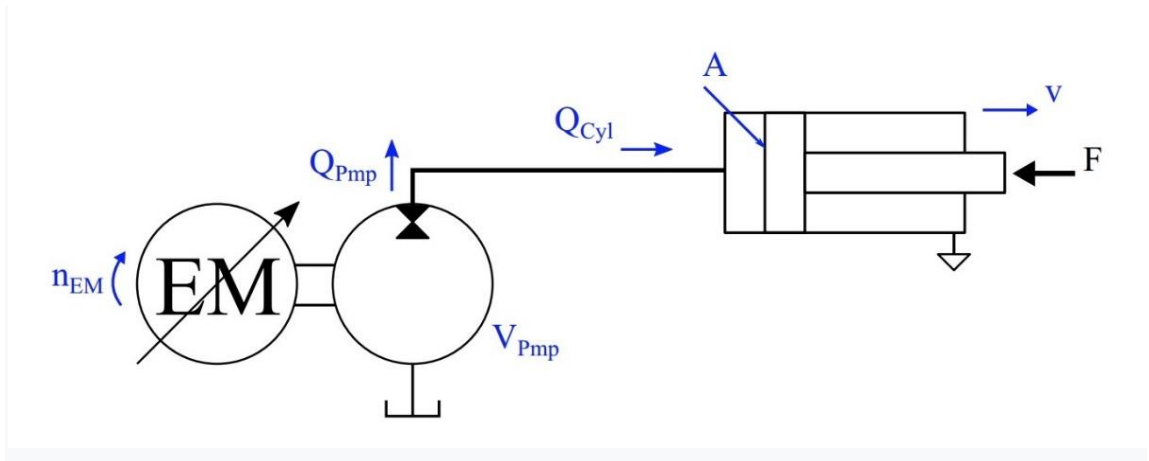
Monia sähköön liittyviä ratkaisuita on jo kehitelty ja tutkittu, mutta vielä on myös monia tekniikoita ja teknologioita, jotka vaativat tutkimista. Pääongelmana on raskaiden työkoneiden käytön energiatehokkuus perinteisillä hydraulijärjestelmillä. Tarkoituksena oli selvittää tutkimustulosten menetelmiä ja ratkaisuita, jotka koskivat työkoneiden sähköistämistä.

Tavallisella hydraulisyylinterillä on edullista ja yksinkertaista toteuttaa lineaarinen liike. Perinteisen hydrauliiikan korkeat voimatasot mahdollistavat kompaktit järjestelmät ja painavien kuormien hallinnan, jotka ovat tyypillisiä tehtäviä raskaille työkoneille. Sähköhydraulisista toimilaitteista on tehty muutamia aiempia tutkimuksia yleisellä tasolla, mutta niissä ei ole käsitelty perusteellisesti EHA:a raskaissa työkoneissa.

### **3.1.2 Tutkimuksen EHA-ratkaisut ja päätelmät**

Tutkimuksen mukaan sähköhydraulinen toimilaitteisto koostuu pääasiassa kahdesta asiasta. Pääkohdat ovat sähkömoottorin pyörimisnopeuden tarkka ohjaus sekä jokaisen toimilaitteen itsenäinen hydraulipumppu. Sähköhydrauliset toimilaitteet ovat jo kaupallistettu lentokoneisiin ja kiinteisiin laitesovelluksiin, mutta ne eivät ole vielä vakiintuneet työkonekäytössä. Perinteiseen järjestelmään verrattuna EHA:n useat sähkömoottorit, pumput ja erilaiset hydraulipiirit sekä turvallisuusstandardit saattavat olla syy pysytellä vanhoissa järjestelmissä. Tässä tutkimuksessa tekniikkaa on tutkittu pidemmälle, sillä sähköhydrauliset toimilaitteet mahdollistavat huomattavasti paremman energiatehokkuuden kuin perinteiset venttiiliohjatut hydraulikkajärjestelmät. Siksi julkaisun tekijät uskovat, että sähköhydrauliset toimilaitteet tulevat myös työkone-markkinoille ennemmin tai myöhemmin.

EHA:n yksinkertainen suora toteutus yhdellä sähkömoottorilla ja yhdellä toimilaitteella mahdollistaa ohjauksen toteutuksen pelkästään sähkömoottorin vääntöä ja pyörimisnopeutta kontrolloimalla. Kuvasta 3 nähdään, miten sylinterin nopeuden ohjaus on toteutettu.



**Kuva 3.** Toimilaitteen sähköhydraulinen ohjaus [1]

Sylinterin varren liikenopeus  $v$  saadaan laskettua kaavalla (1) sylinteriin menevän tilavuusvirran  $Q_{Cyl}$  ja männän pinta-alan  $A$  avulla.

$$v = \frac{Q_{Cyl}}{A} \quad (1)$$

Kaavalla (2) saadaan pumpun tilavuusvirta  $Q_{Pmp}$ , joka on sähkömoottorin pyörimisnopeuden  $n_{EM}$  ja pumpun kierrostilavuuden  $V_{Pmp}$  tulo.

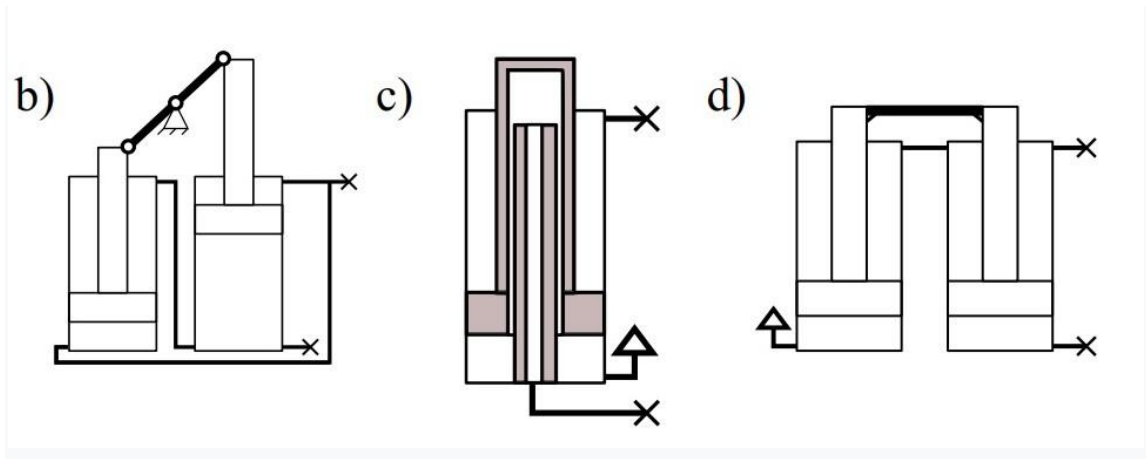
$$Q_{Pmp} = n_{EM} * V_{Pmp} \quad (2)$$

Koska pumppu on kytketty suoraan toimilaitteeseen, niin sylinterin ja pumpun tilavuusvirrat ovat samat  $Q_{Cyl} = Q_{Pmp}$ . Saadaan, että sylinterin varren liikenopeus  $v$  voidaan laskea myös kaavalla (3), jossa yhdistetään kaavat (1) ja (2).

$$v = \frac{n_{EM} * V_{Pmp}}{A} \quad (3)$$

Pumppuohjattujen toimilaitteiden haasteena on differentiaalivirtaus. Kaksivartiset sylinterit tai pyörivät toimilaitteet, joilla on symmetrinen sisään- ja ulosvirtaus, mahdollistavat toimilaitteiden kytkemisen suoraan pumppuun. Raskaissa työkonneissa käytetään usein yksivartisia sylintereitä, jolloin differentiaalivirtaus aiheuttaa haasteita. Kuvassa 4 näkyy erilaisia erityistapauksia, joissa virtaus on symmetrinen myös yksivartisissa sylintereissä.

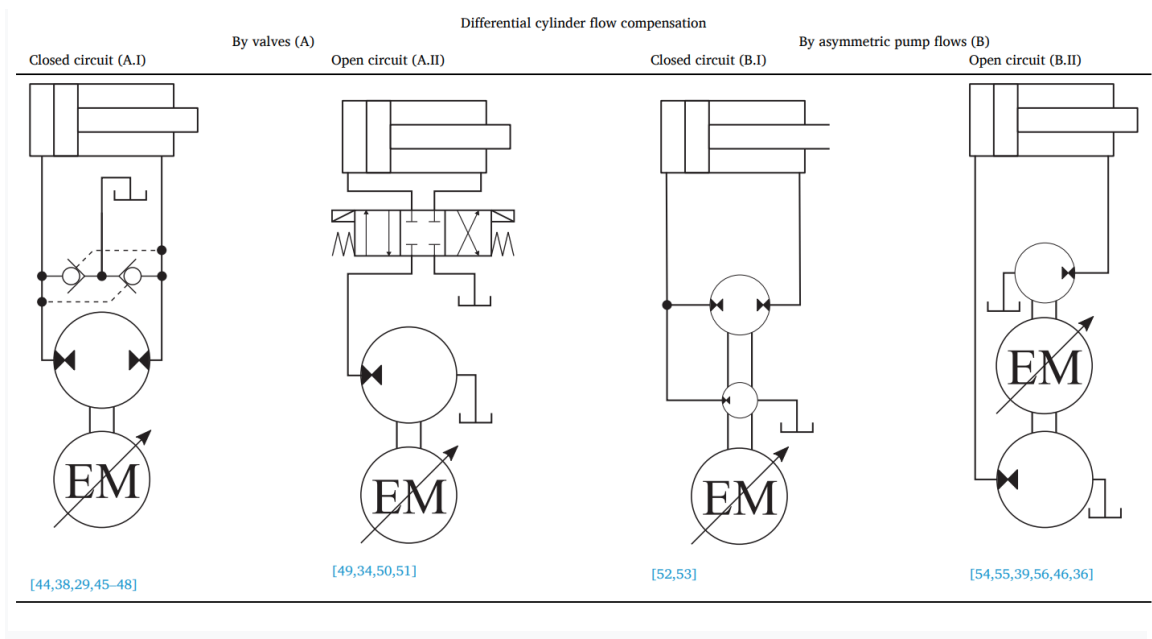
Esimerkiksi kuvan 4 b-kohdassa nähdään yhdistelmä kahdesta vastakkain toimivasta sylinteristä, jotka muodostavat symmetrisen virtauksen. C-kohdassa symmetrinen virtaus on toteutettu monikammiosylinterin avulla ja d-kohdassa symmetrinen virtaus saavutetaan kahden rinnankytketyn sylinterin avulla.



**Kuva 4.** Differentiaalivirtaus erityistapaukset yksivartisissa sylintereissä [1]

Differentiaalivirtauksen kompensoimiseen yksivartisissa sylintereissä on myös muita säätöratkaisuita. Tällaisia säätöratkaisuja ovat esimerkiksi venttiilikompensoidulla virtauksella tai asymmetrisillä pumpuilla toteutetut järjestelmät, joista näkyvät esimerkit kuvassa 5.

Kuvan 5 A-kohdissa kuvataan säätöratkaisuja sylinterin differentiaalivirtauksen kompensoimiseen venttiiliohjauksella. A.I-kohdassa nähdään suljetun piirin ratkaisu ja A.II-kohdassa on avoimen piirin kaavio. B.I ja B.II-kohdat puolestaan esittävät differentiaalivirtauksen kompensoimista asymmetrisillä pumppuratkaisuilla avoimessa ja suljetussa piirissä.



**Kuva 5.** Piirien venttiili- ja pumppukompensaatio ratkaisut [1]

Tutkimuksessa käsiteltiin erilaisia raskaiden työkonien sähköistämismetodeja, akateemisesta ja teollisuuden näkökulmista. Kaikki tarpeelliset järjestelmäkomponentit tarkasteltiin erikseen hydraulikan piirikaavioiden, liikkuvien energianlähdevaihtoehtojen sekä sähkömoottori-pumppuyhdistelmien näkökulmasta, jotka muodostaisivat rajapinnan hydraulikan ja sähkön välille.

Tutkimuksen löydöt ovat samalla avainkohtia, jotka huomioimalla sähköhydrauliset järjestelmät voisivat yleistyä ja saavuttaa paremman markkina-aseman. Julkaisun yhteenvedossa mainittuja työkoneiden sähköistämisen näkymiä, hyötyjä ja haasteita ovat:

- Ensimmäinen vaihtoehto voisi olla polttomoottorin korvaaminen sähkömoottorilla, jolloin saavutettaisiin nollapäästöt ja alhainen melu.
- Seuraava askel olisi uusien paremmin sähkömoottoreita hyödyntävien EHA-konseptien käyttäminen, joita on vasta kokeiltu akateemisessa maailmassa. Päästötön ja hiljainen järjestelmä sekä huomattavasti pienentynyt energiankulutus ja parempi ohjattavuus olisivat näin saavutettavissa.
- Sähköisten toimilaitteiden haasteet kaupallisissa raskaissa työkoneissa ovat muun muassa suurien toimilaitteiden sijoittaminen työkoneeseen, jäähdytys, suodatus ja korkeat komponenttikustannukset. Näihin ongelmiin on jo ehdotettu osaratkaisuja, mutta toistaiseksi mikään ratkaisu ei ole kyennyt vastaamaan kaikkiin ongelmiin tarpeeksi kattavasti ja kustannustehokkaasti. Kaksipumppuiset EHA:t näyttävät kuitenkin sopivammilta raskaille työkoneille kuin yhden pumpun EHA:t.
- Sähkömoottori-pumppuyhdistelmän valinnalla on merkittävä vaikutus koko sähköhydraulisen järjestelmän tehokkuuteen ja kustannuksiin. Useimmissa julkaisuissa ja kaupallisissa järjestelmissä käytetään vakiopumppuja. Pumppujen uudelleensuunnittelulla, erityisesti sähköhydraulisia toimilaitteita varten, voitaisiin mahdollistaa tehokkaammat ja käytännöllisemmät hydraulijärjestelmät.
- Akkuteknologioiden käyttö raskaissa työkoneissa on hankalaa. Nykyiset akut riittävät lähinnä vain pieni- ja keskitehoisten koneiden tarpeisiin ja silloinkin käyttöaika on melko lyhyt. Lupaavimpina uutena teknologiana raskaiden työkoneiden sähköistämiseen on polttokennot, mutta niiden ongelmana on korkeat komponenttikustannukset ja vetynfrastrukturi.

Kirjoittajat ovat vakuuttuneita siitä, että tulevaisuudessa kilpailukykyiset, energiatehokkaat ja kustannustehokkaat sähköhydrauliset toimilaitteet raskaissa työkoneissa saadaan käyttöön, kun julkaisussa esitetyt tutkimustulokset ja avainkohdat otetaan kehitystyössä huomioon.

## 3.2 Julkaisu 2: A High-Efficient Solution for Electro-Hydraulic Actuators with Energy Regeneration Capability

Tässä alaluvussa käsitellään artikkelia ”A High-Efficient Solution for Electro-Hydraulic Actuators with Energy Regeneration Capability”, jossa Qu et al. [6] esittävät toimintavarman ja kustannustehokkaan sähköhydraulisen toimilaiteratkaisun. Julkaisussa esitellään uudenlaisen EHA-järjestelmän avoimen piirin ja suljetun piirin perusrakennetta sekä ominaisuuksia.

Toimilaitetasolla ratkaisu perustuu muuttuvanopeuksiseen sähkömoottoriin ja kiinteätilavuuksiseen pumppuun, joilla ohjataan yksivartista differentiaalista hydraulisyliinteriä. Järjestelmässä on suljetun piirin tapauksessa paineakusto mukana. Yleisesti sähköhydraulisten toimilaitteiden haasteina ovat korkeat kustannukset ja rajoitettu suorituskyky, jotka hankaloittavat sähköistämistä ja EHA:n käyttöä työkoneissa. Julkaisussa esitetty EHA-ratkaisu on kustannustehokas, mahdollista toteuttaa kompaktisti sekä pystyy energian regenerointiin. Järjestelmän tutkimisen apuna käytettiin simulointimalleja, todellisen järjestelmän mitoitusta sekä testilaitteistoa ja tuloksia vertailtiin keskenään.

### 3.2.1 Tutkimuksen pääkohdat ja tavoitteet

Perinteisiä hydrauliiikkajärjestelmiä on käytetty monissa tekniikan sovelluksissa jo vuosikymmeniä niiden tehokkuuden, matalan hinnan ja luotettavuuden takia. Kuitenkin perinteisen hydraulijärjestelmän ongelmana on sen matala energiatehokkuus. Oak Ridge National Laboratorion tekemässä tutkimuksessa havaittiin, että työkonekäytössä Yhdysvaltojen markkinoilla keskimääräinen hyötysuhde oli vain noin 21 %:a. Matala hyötysuhde johtuu pääosin kuristushäviöistä, joka aiheutuu toimilaitteen nopeuden säädöstä, ja siitä ettei järjestelmästä takaisin saatavaa energiaa ole hyödynnetty.

Kaivinkoneet, kauhakuormaajat, nosturit ja traktorit käyttävät tyypillisesti keskitettyä hydrauliarkkitehtuuria. Keskitetyissä hydraulijärjestelmäratkaisuisa aiheutuu kuristushäviöitä koska toimilaitteen ohjaus tapahtuu venttiileillä ja voima tuotetaan usealle toimilaitteelle samalla hydraulipumpulla. Tutkimukset ovat osoittaneet, että hajautettu hydraulijärjestelmä on yksi vaihtoehto, jolla voidaan saavuttaa korkeampi hyötysuhde. Hajautettu hydraulijärjestelmä voidaan toteuttaa esimerkiksi tilavuusohjatuilla DC-järjestelmillä, jotka perustuvat muuttuvati-lavuuksiin hydraulipumppuihin ja kiinteänopeuksiin moottoreihin. Vaihtoehtoisesti hajautettu hydraulijärjestelmä voidaan toteuttaa sähköhydraulisten toimilaitteiden avulla. Molemmilla ratkaisuilla pystytään vähentämään ohjausventtiilien aiheuttamia kuristushäviöitä.

Sähköhydrauliset toimilaitteet ja hybriditeknologiat ovat tällä hetkellä energiatehokkain ratkaisu työkonekäytössä. Sähköhydraulisen hybridijärjestelmän ansiosta EHA:t pystyvät palauttamaan energiaa joko sähkö- tai hydrauliakustoihin avustavien työvaiheiden aikana. Tutkimuksessa esitetty konfiguraatio perustuu muuttuvanopeuksiseen sähkömoottoriin ja kiinteätilavuuksiseen pumppuun, joilla ohjataan differentiaalista yksivartista sylinteriä. Viimeisimmissä tutkimuksissa on havaittu tällaisen konfiguraation olevan kätevä energiatehokkuuden kannalta. Samankaltaiset sähköhydrauliset toimilaitteet ovat vakiinnuttaneet paikkansa lentokoneteollisuudessa.

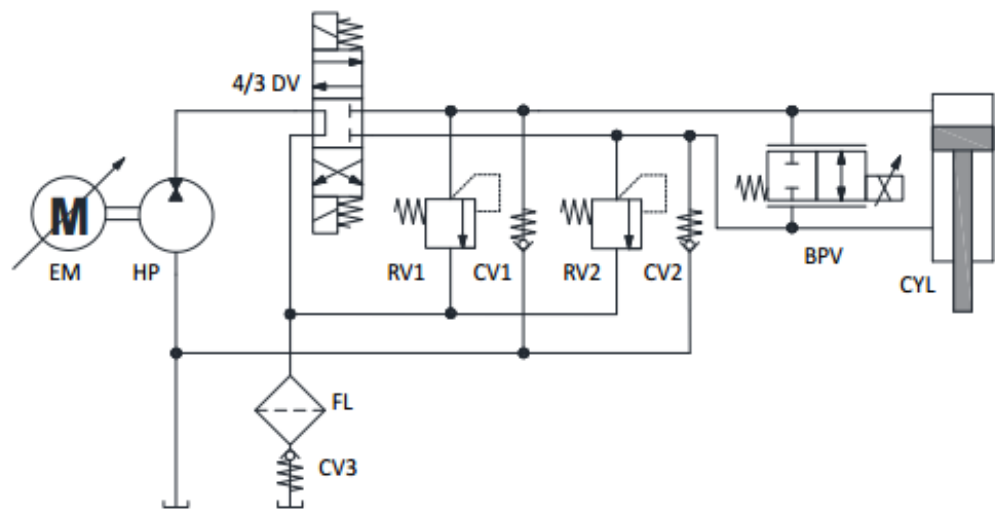
Tutkimuksessa esitetään EHA-ratkaisua, joka lähestyy teknisiä haasteita erityisesti työkoneiden näkökulmasta. Monissa lentokoneissa ja robotiikan alueella käytettävissä EHA-järjestelmissä ei ole energian takaisinottoa ja käytettävät hydraulipumput ovat kalliita muuttuvatilavuuksisia pumppuja. Operointi matalilla liikenopeuksilla on haasteellista toteuttaa tehokkaasti kiinteätilavuuksisia pumppuja käyttävillä sähköhydraulisilla toimilaitteilla. Tässä esitetään kustannustehokas EHA-järjestelmä, jolla liikkeenohjaus voidaan toteuttaa laajalla nopeusalueella.

EHA:n mitoitus perustuu yleensä jokaisen toimilaitteen maksimivirtaukseen. Ehdotettu ratkaisu mahdollistaa toimilaitteiden hydraulipumpun mitoituksen siten, että sylinterin maksivirtauksen ei tarvitse täyttyä, jolloin järjestelmä voidaan niin sanotusti alimitoitaa. Järjestelmä voidaan alimitoitaa koska sylinterillä on vain yhdessä sisäänvetovaiheen tilassa suurempi tilavuusvirta kuin mitä pumppu tuottaa. Tämä toiminnallisuus on toteutettu tässä tapauksessa ohitusventtiilillä.

Kirjoittajat olivat tehneet alustavaa työtä järjestelmän suunnitteluun, mutta kokeellista todentamista tai järjestelmäarkkitehtuurien vertailua ei tutkimuksessa tehty. Lisäksi järjestelmän toimintaa kaikissa toimintaneljänneksissä ei huomioitu järjestelmissä. Näiden puutteiden korjaamiseksi tutkimuksessa esitellään yksityiskohtaisesti kaksi erilaista kokoonpanoa, jotka käsittelevät EHA:n toteuttamista kustannustehokkaasti.

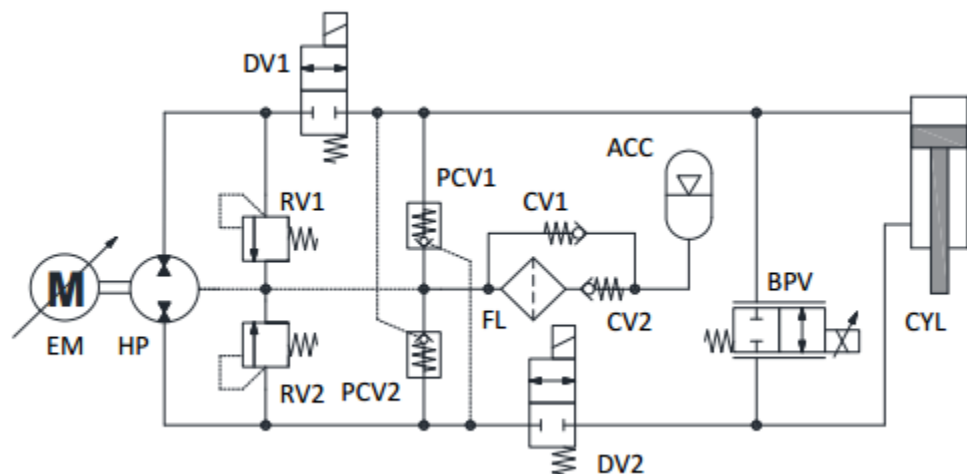
### **3.2.2 EHA-järjestelmät ja päätelmät**

Tutkimus keskittyi kahteen eri EHA-arkkitehtuuriin, jotka olivat avoimen ja suljetun kierron sähköhydrauliset toimilaitteet. Avoimessa järjestelmässä hydraulipumpun toinen puoli on kytketty sylinteriin korkean paineen puolelta ja toinen puoli pumpusta matalan paineen puolelle. Säädettävänopeuksinen sähkömoottori ja kiinteätilavuuksinen pumppu toimivat pumppumoottorina vain yhteen suuntaan, mutta 4/3-venttiilillä pystytään toteuttamaan pumppumoottorin toiminnallisuus molempiin suuntiin. Kuvassa 6 nähdään avoimen kierron hydraulikaavio.



**Kuva 6.** Avoimen piirin hydraulikaavio [6]

Suljetun piirin järjestelmässä pumpun molemmat puolet ovat kytketty suoraan sylinteriin. Korkeapainepumpun porttia voidaan ohjata toiminnan aikana. Pumppu voi toimia pumppumotto- rina molempiin suuntiin, jolloin 4/3-ohjausventtiiliä ei tarvita. Järjestelmä sisältää samanlaisen sähkömoottorin, sylinterin ja ohitusventtiilin samoilla toiminnallisuuksilla, kuin avoin piirijärjes- telmä. Pääerona avoimeen piirijärjestelmään on paineakku, joka kompensoi differentiaalivir- tausta sylinteristä sylinterin ulos- ja sisäänmeno vaiheissa. Kuvassa 7 on esitetty suljetun kierron järjestelmä.

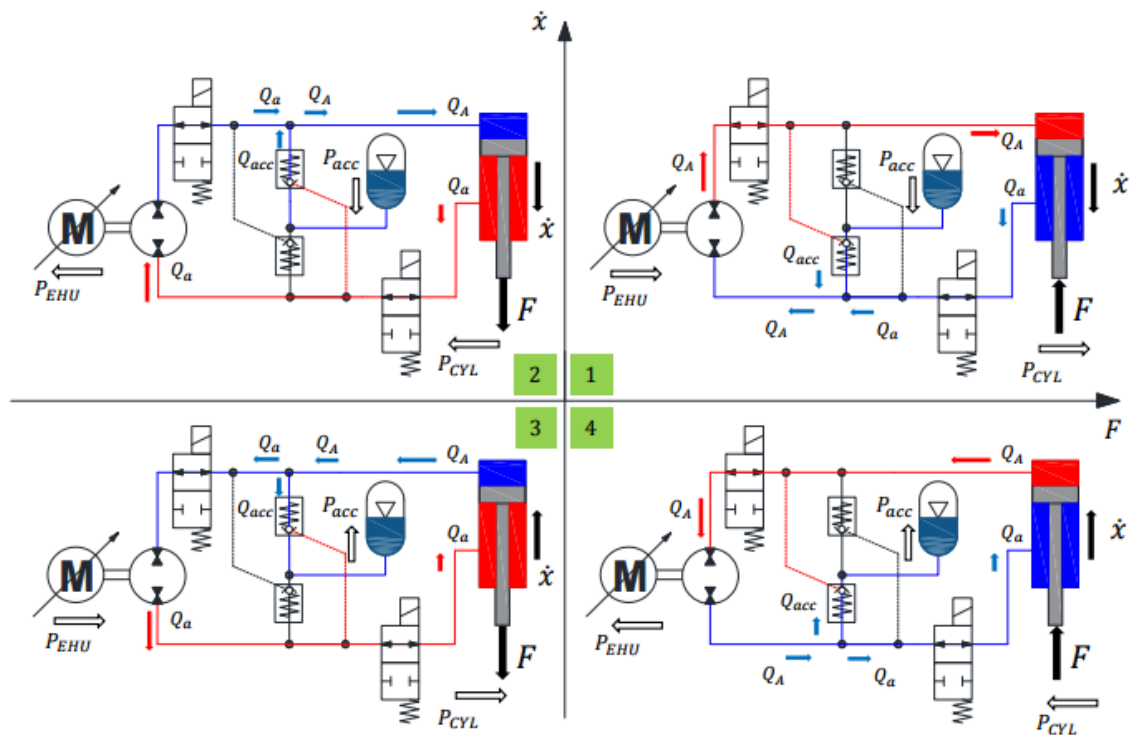


**Kuva 7.** Suljetun piirin hydraulikaavio [6]

Tutkimuksessa esitettiin lisäksi suljetun piirin pumppumoottorin toiminta. Toimilaitteella on neljä erillistä tilaa, joissa kuvataan sylinterin kuormitusvaiheita ja aputiloja, joissa esimerkiksi energian regenerointi tapahtuu. Kuvassa 8 esitetään suljetun kierron toimintatilat. Sylinterin

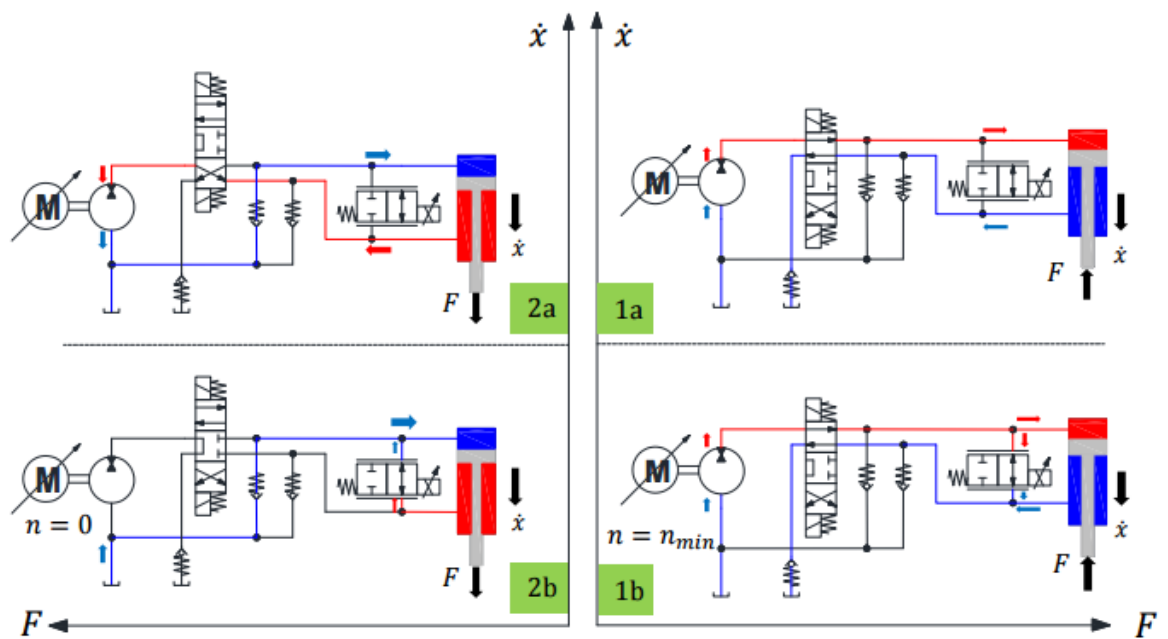


ulos- ja sisäänmeno tilanteissa kuormitus on vastainen tai myötäinen sylinterin liikesuunnan suhteen.



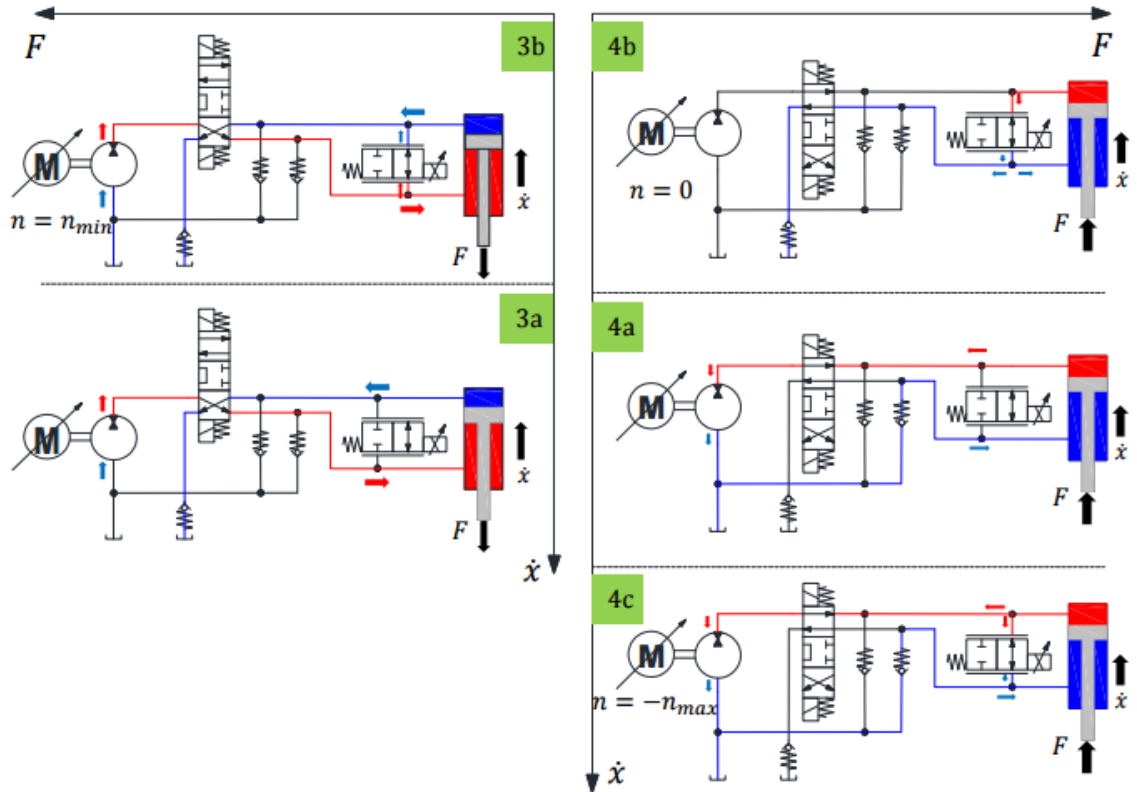
**Kuva 8.** Suljetun kierron toimintatilat [6]

Avoimen kierron toimintatilat 1 ja 2 esitetään kuvassa 9, joissa sylinterin varsi liikkuu ulospäin kuormituksen ollessa sisään- tai ulospäin. Kuvassa 9 ja 10 a:lla viitataan ohjauksen päätiloihin ja b:llä puolestaan esitetään alhaisen liikenopeuden ohjaustiloja.



**Kuva 9.** Avoimen kierron 1 ja 2 toimintatilat [6]

Kuvasta 10 nähdään avoimen kierron 3 ja 4 tilat silloin kun sylinterin varren liikesuunta on sisäänpäin, kuorman ollessa ulos- tai sisäänpäin. Pääasialliset toimintatilat on merkitty a:lla, alhaisen nopeuden tilat merkitty b:llä ja nopean liikkeen tila c:llä. Nopean liikkeen tilassa 4c kuvataan tapausta, jossa ohitusventtiiliä avaamalla pystytään toteuttamaan nopeampi liike kuin mitä pelkän pumpun tilavuusvirta mahdollistaa.



**Kuva 10.** Avoimen kierron 3 ja 4 toimintatilat [6]

Lopputuloksena oli, että esitetyn simulointimallin ja testijärjestelmän EHA:n avulla voidaan saavuttaa yli 80 %:n hyötysuhde molemmilla arkkitehtuurivarianteilla. Yksilöllistetty arkkitehtuuri toimii tehokkaasti vähentäen kuristushäviöitä ja mahdollistaa energian regeneroinnin. Ehdotetun järjestelmän hyödyt ja haasteet ovat:

- Esimerkiksi toimilaitteen tiloissa, joissa ohitusventtiili on auki, tehokkuus jää matalaksi kuristushäviöiden takia.
- Avoimen ja suljetun kierron EHA:a vertaillen avoimen kierron järjestelmä oli parempi energiatehokkuuden kannalta. Tämä johtuu siitä, että yhteen suuntaan toimiva pumpu on tyypillisesti hyötysuhteeltaan parempi kuin molempiin suuntiin pumppumootorina toimimaan suunniteltu pumpu.
- Ehdotettua järjestelmää voitaisiin käyttää sähköhydraulisena toimilaiteratkaisuna kustannustehokkaasti myös työkonetyössä. Sillä saavutetaan korkea energiatehokkuus ja lisäksi energian regenerointi on mahdollista. Esitetyn järjestelmän käytöllä hyötysuhde voisi nousta 21 %:sta jopa 80 %:iin.

- Matalan liikenopeuden tiloissa EHA:lla on aina matala hyötysuhde. Kuitenkin monissa työkoneissa, kuten kaivureissa ja kauhakuormaajissa, matalan liikenopeuden tiloja esiin-tyyy vain harvoin. Matala hyötysuhde alhaisen liikenopeuden tiloissa ei siis vaikuta mer-  
kittävästi energian kokonaiskulutukseen.

Tulevaisuudessa tutkimusta voidaan laajentaa koskien sähkölaitteen tekniikkaa yhdessä hyd-  
rauliikan kanssa, jotta voidaan löytää optimaalisia ratkaisuita niiden yhdistämiseksi. Lisäksi läm-  
pötilan tutkiminen esitetyssä järjestelmässä on tärkeää ja jäähdytysratkaisuita mahdollisesti tar-  
vitaan esitetyssä EHA:ssa. Tutkimuksen pohjalta tehtyjen havaintojen perusteella seuraavana  
vaiheena olisi toteuttaa esitelty EHA-ratkaisu todelliseen sovellukseen, jotta energiankulutus  
voitaisiin mitata todellisen laitteiston perusteella.

### **3.3 Julkaisu 3: Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators**

Tämä alaluku esittää artikkelin ”Novel concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Con-  
trol of Hydraulic Manipulators” pääkohdat, joissa Jensen et al. [7] esittävät tietynlaista EHA-kon-  
septia vaihtoehtoisena ratkaisuna jo olemassa oleviin ratkaisuihin. Tutkimuksen tavoitteena oli  
osoittaa EHA:n soveltumiskelpoisuus sovelluksissa, joissa tällä hetkellä käytetään perinteisiä  
hydraulijärjestelmiä, esimerkiksi hydraulisissa nostureissa. Sähköhydraulisten toimilaitteiden sa-  
mankaltainen suorituskyky ja parempi tehokkuus perinteisiin hydraulijärjestelmiin verrattuna  
ovat syynä siihen, että niitä käsitellään tässä tutkimuksessa.

#### **3.3.1 Sähköiset hydraulijärjestelmät**

Sähköhydrauliset toimilaitteet ovat lisänneet suosiotaan lähiaikoina, mutta niitä ei vielä ole to-  
teutettu suuritehoisissa hydraulisissa manipulaattoreissa. Artikkelissa esitellään perusajatus  
sähköhydraulisen toimilaitteen soveltuvuudesta suuriin hydraulisiin manipulaattoreihin. Toimi-  
laite on suunniteltu ja analysoitu täyttämään vaaditut ehdot, kuten kuormanpito, ylikuormitus  
ja differentiaalivirtauksen kompensointi. Järjestelmän energiatehokkuutta ja energian re-  
generointikykyä analysoidaan molempiin suuntiin toimivan pumppumoottorin toiminnan ai-  
kana. Perinteiseen venttiiliohjattuun järjestelmään verrattuna sähköhydrauliset toimilaitteet  
ovat merkittävästi energiatehokkaampia, niillä on samankaltainen dynaaminen vaste sekä ener-  
gian regenerointikyky.

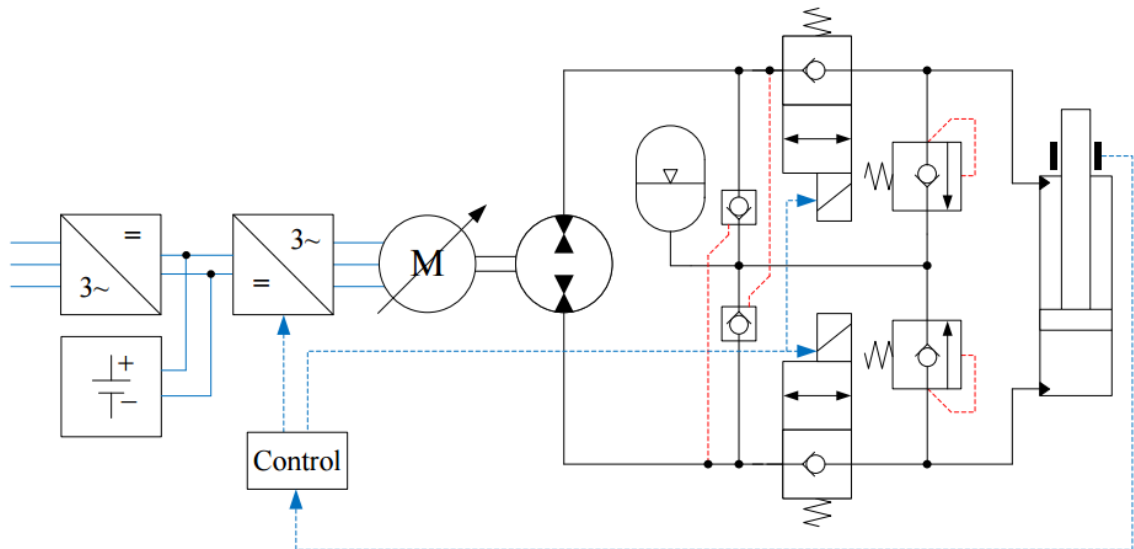
Viime vuosina trendinä on ollut perinteisten järjestelmien korvaaminen sähköisillä järjestelmillä. Sähköistämällä on odotettu parempaa hyötysuhdetta samankaltaisella tai paremmalla suorituskyvyllä. Joissain järjestelmissä käytetään sähkön ja hydrauliiikan yhdistelmiä ja toisissa, kuten telanostureissa, on pystytty siirtymään kokonaan sähkökäyttöön. Perinteisessä hydrauliiikassa järjestelmää ajetaan yleisesti vakionopeusinduktiomootorilla ja hydrauliventtiilit mahdollistavat toimilaitteiden liikkeen hallinnan. Kun osa suorituskyvyn parantamisesta tulee ainoastaan korvaamalla induktiomootorit sähköhydraulisilla toimilaitteilla, niin myös proportionaaliventtiilien poistaminen vähentää kuristushäviöitä.

Sähköautojen suosion kasvaessa kehitys ja tutkimus sähköisten työkonien osalta on myös alkanut kasvamaan. Vaikka polttomootori korvattaisiin sähkömootorilla, niin hydraulisyntereiden tarve työkonissa silti säilyy, eikä niille ole sähköistä korviketta korkean tehon sovelluksissa. Energiatehokkuuden näkökulmasta tämä on johtanut lisääntyvään kiinnostukseen sähköhydraulisia toimilaitteita kohtaan.

### **3.3.2 Huomioita ja päätelmät**

Sähköhydraulisten toimilaitteiden sisäänrakennetut komponentit mahdollistavat sen, ettei pitkiä hydrauliletkuja eikä niin monia liitoksia tarvita kuin perinteisissä hydraulijärjestelmissä. Vähemmän liitoksia ja hydrauliletkuja tarkoittaa pienempää riskiä myös nestevuodoille, joten myös ympäristön saastumiseen on pienemmät riskit.

Hybridijärjestelmissä EHA:t tarvitsevat energiavarastoja, kuten sähköakkuja jotta energian regenerointi olisi mahdollista. Kun kaikilla toimilaitteilla on omat sähkömootorit, niin jokaista toimilaitetta pystytään ajamaan täydellä teholla. Tämä EHA-ratkaisu myös poistaa ongelmat perinteisissä järjestelmissä esiintyvien virtaus- ja paine-erojen suhteen. Kuvassa 11 esitetään tutkimuksessa ehdotettu EHA-järjestelmä.



**Kuva 11.** Julkaisussa ehdotetun sähköhydraulisen toimilaitteen kaavio [7]

Perinteisessä kuorman tuntevassa järjestelmässä pumpun täytyy tuottaa korkea paine koko järjestelmään, vaikka vain yksi toimilaite vaatisi korkean paineen. Uuden EHA-järjestelmän pääerona kuormitustilanteessa heilahdukseneston ollessa käytössä oli merkittävästi pienentynyt energiankulutus verrattuna tavalliseen venttiiliohjattuun järjestelmään. Toisaalta EHA-järjestelmän hankintahinta, joka koostuu muun muassa servomoottorista, servo-ohjauksesta ja akkujärjestelmästä, kuitenkin kompensoi järjestelmästä saatavia säästöjä.

Artikkelissa tutkittiin sähköhydraustaattisten toimilaitteiden soveltuvuutta suurien moniakselisten hydraulisten manipulaattoreiden käyttötarkoitukseen. Järjestelmä suunniteltiin ja analysoitiin täyttämään kuormanpidon, ylikuormanhallinnan ja differentiaalivirtauksen kompensoinnin vaatimukset. Numeraalisen analyysin tulokset osoittivat korkeaa tehosuhdetta ja hyvää seurantakykyä neljänneljänneksen toiminnan kaikissa toimintavaiheissa. Tulokset osoittivat myös korkeaa energian regenerointi kykyä.

Uutta EHA-järjestelmää sekä perinteistä venttiiliohjattua järjestelmää testattiin hydraulinosturissa. Järjestelmien eroja vertailtiin suorituskyvyn ja energiatehokkuuden kannalta. Simulointimallit osoittivat, että järjestelmien suorituskyvyssä ei ollut juurikaan eroja, mutta EHA-järjestelmä osoitti energiankulutuksen laskua 82 %:lla. Tulevaisuuden EHA-tutkimus voisi koskea mahdollista EHA:n suunnittelua erityisesti korkean tehon sovelluksissa ja tällaisesta voitaisiin rakentaa prototyyppi, jotta tutkimuksesta saadut tulokset voitaisiin varmistaa.

## 4. YHTEENVETO

Työssä käsiteltiin sähköhydraulisia toimilaitteita sekä niiden sovelluksia työkoneissa. Työssä selvitettiin sähköhydraulisten toimilaitteiden toimintaa yleisellä tasolla. Lisäksi perehdyttiin sähköhydraulisten toimilaitteiden toimintaperiaateisiin, käyttökohteisiin sekä hyötyihin ja haasteisiin. Työssä keskityttiin selvittämään uusimpien tutkimusten ratkaisuja olemassa oleviin haasteisiin sähköhydraulisten toimilaitteiden käyttöön työkoneissa.

Työn tavoitteena oli koota yhteen tutkimuksia uusimmista menetelmistä erilaisiin sähköhydraulisten toimilaitteiden toteutuksiin sekä selvittää niiden nykyisiä mahdollisia käyttökohteita. Työhön valittiin kolme sähköhydraulisiin toimilaitteisiin liittyvää julkaisua, joista kerrottiin tarkemmin. Julkaisut käsittelevät uusimpia EHA-ratkaisuita, joita voitaisiin soveltaa myös työkonekäyttöön.

Julkaisuiden ja muun kirjallisen tiedon pohjalta voidaan todeta, että sähköhydraulisilla toimilaitteilla on todennäköisesti merkittävä rooli tulevaisuuden työkoneiden suunnittelussa. Yhtenä tärkeimpänä esille nousseista asioista oli, että sähköhydrauliset toimilaitteet mahdollistavat merkittävät energiansäästöt perinteisiin hydraulijärjestelmiin verrattuna. Lisäksi esimerkiksi neste-  
vuodot ovat epätodennäköisempiä sähköhydraulisissa toimilaitteissa.

Sähköhydraulisilla toimilaitteilla on myös haasteita työkonekäytössä. Suurimpana haasteena esille nousi sähköhydraulisten toimilaitteiden korkea hinta verrattuna perinteisiin toimilaitteisiin. Työhön valikoiduissa tutkimuksissa käsiteltiin myös kustannuskysymystä ja yhdessä tutkimuksessa siihen esitettiin ratkaisua.

Jatkotutkimusaiheena voisi selvittää, onko jo olemassa kokonaan sähköhydraulisilla toimilaitteilla toteutettuja työkoneita, ja perehtyä niiden käyttämiin ratkaisuihin. Lisäksi tutkimuksissa käsiteltyjen ratkaisujen toteuttaminen tai jonkin niistä toteuttaminen käytännössä työkoneeseen voisi olla tutkimisen arvoista.

## LÄHTEET

- [1] David Fassbender, Viacheslav Zakharov, Tatiana Minav, Utilization of electric prime movers in hydraulic heavy-duty-mobile-machine implement systems, Elsevier B.V., Vol. 132, 2021. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521004155?via%3Dihub>
- [2] Ludger Frerichs, Karl Hartmann, Efficient and high performing hydraulic systems in mobile machines, 10th International Fluid Power Conference, Paper 8, s.33-44, 2016, Saatavissa: <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A29378/attachment/ATT-0/?L=1>
- [3] Emily Newton, What Are the Pros and Cons of Electro-Hydraulic Actuators?, Empowering Pumps & Equipment, 2022. Saatavissa (viitattu 1.4.2023): <https://empoweringpumps.com/what-are-the-pros-and-cons-of-electro-hydraulic-actuators/>
- [4] Electro-hydraulic actuator, Wikipedia, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.3.2023): [https://en.wikipedia.org/wiki/Electro-hydraulic\\_actuator](https://en.wikipedia.org/wiki/Electro-hydraulic_actuator)
- [5] Parker Hannifin Corporation, Parker Compact Electro-Hydraulic Actuator (EHA), 2011. Saatavissa: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Hydraulic-Pump-Division/Oildyne-EHA/Compact-EHA-Instruction-Manual-HY22-3200B-7-13.pdf>
- [6] Shaoyang Qu, David Fassbender, Andrea Vacca, Enrique Busquets, A High-Efficient Solution for Electro-Hydraulic Actuators with Energy Regeneration Capability, Individual Electro-Hydraulic Drives for Off-Road Vehicles, Vol. 216, 2020. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/345829033\\_A\\_High-Efficient\\_Solution\\_for\\_Electro\\_Hydraulic\\_Actuators\\_with\\_Energy\\_Regeneration\\_Capability](https://www.researchgate.net/publication/345829033_A_High-Efficient_Solution_for_Electro_Hydraulic_Actuators_with_Energy_Regeneration_Capability)
- [7] Konrad Johan Jensen, Morten Kjeld Ebbesen, Michael Rygaard Hansen, Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators, Energies, Department of Engineering Sciences, University of Agder, Vol.14, No.20, 2021, Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6566>