

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2024

Joona Jännäri

# Ottomoottorin imu- ja pakoventtiilien sähkömekaaninen ohjaus



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2024 | 37 sivua

Ohjaaja: Lehtori, TkL Markku Ikonen

Joona Jännäri

## Ottomoottorin imu- ja pakoventtiilien sähkömekaaninen ohjaus

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ottomoottorin sähkömekaanista venttiilien ohjausta ja sen tarjoamia mahdollisuuksia moottorin suorituskyvyn parantamisessa sekä päästöjen vähentämisessä. Työn taustalla oli kirjoittajan oma mielenkiinto perehtyä teknologian toimintaperiaatteisiin ja selvittää, millaisia hyötyjä ja haasteita sen käyttöönotto moottoriteollisuudessa voisi mahdollistaa.

Kirjallisuuskatsauksessa kartoitettiin aiempia tutkimuksia ja artikkeleita sähkömekaanisesta venttiilien ohjauksesta, joiden pohjalta muodostettiin ymmärrys teknologian nykytilasta, sen toimintaperiaatteista ja mahdollisuuksista tulevaisuudessa.

Tutkimuksen tuloksena saatiin selville, että sähkömekaaninen venttiilien ohjaus voi merkittävästi parantaa moottorin joustavuutta ja suorituskykyä ajon aikana. Tulokset osoittivat, että teknologia mahdollistaa tarkemman venttiilien säädön eri käyttötilanteissa, mikä voi johtaa polttoaineen tehokkaampaan hyödyntämiseen ja pienempiin päästöihin. Kiinnostuneelle lukijalle tutkimus tarjoaa kompaktin tietopaketin aiheesta.

Asiasanat: Aktuaattori, Nokka-akseliton, Ohjaustekniikka, Optimointi, Sähkömekaniikka, Venttiili

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Degree Programme in Automotive and Transportation Engineering

2024 | 37 pages

Supervisor: Senior Lecturer, Lic.Tech. Markku Ikonen

Joona Jännäri

## Electromechanically Controlled Intake and Exhaust Valves in an Otto Engine

The objective of this thesis was to explore the electromechanical valve control of an internal combustion engine and its potential for improving engine performance and reducing emissions. The motivation behind this work stemmed from the author's personal interest in understanding the principles of this technology and examining the benefits and challenges of its implementation in the automotive industry.

The literature review surveyed previous studies and articles on electromechanical valve control to build a comprehensive understanding of the current state of the technology, its operating principles, and its future potential.

The research findings revealed that electromechanical valve control can significantly enhance engine flexibility and performance during operation. The results indicated that this technology allows for more precise valve adjustments in various operating conditions, leading to more efficient fuel utilization and reduced emissions. For the interested reader, this study provides a concise overview of the topic.

Keywords: Actuator, Camless, Control technology, Electromechanics, Optimization, Valve

# Sisältö

<b>Sanasto ja lyhenteet</b>	<b>6</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Tavanomainen venttiilikoneisto</b>	<b>8</b>
<b>3 Venttiilien ohjausmekanismit</b>	<b>9</b>
3.1 Mekaaninen	9
3.2 Desmodrominen	9
3.3 Hydraulinen	10
3.4 Pneumaattinen	10
3.5 Sähköinen	11
<b>4 Muuttuva venttiilien ohjaus</b>	<b>12</b>
4.1 Muuttuva venttiilien ajoitus	14
4.2 Muuttuva venttiilien aukioloaika	15
4.3 Muuttuva venttiilien avautumiskorkeus	16
<b>5 Täysin muuttuva venttiilien ohjaus</b>	<b>17</b>
<b>6 Venttiilien portaaton säätäminen</b>	<b>18</b>
6.1 Nokka-akselin vaiheistin	18
6.2 Aksiaalisesti siirrettävä nokka-akseli	19
6.3 Kolmioprisma	20
6.4 Säädetävät venttiilien paininvivut	21
6.5 Kierteinen nokka-akseli	21
6.6 Nokka-akselittomat säätöjärjestelmät	22
6.6.1 Hydraulinen	22
6.6.2 Pneumaattinen	22
6.6.3 Sähköinen	23
6.6.4 Yhdistelmä	23
<b>7 Sähkömekaanisen venttiilin tekninen kuvaus</b>	<b>24</b>

<b>8 Sähkömekaanisen ohjauksen tuomat edut</b>	<b>26</b>
8.1 Vääntömomentti	28
8.2 Teho	29
8.3 Kulutus	29
8.4 Päästöt	30
<b>9 Sähkömekaanisen ohjauksen aiheuttamat rajoitukset</b>	<b>31</b>
<b>10 Pohdinta</b>	<b>33</b>
<b>Lähteet</b>	<b>35</b>

## **Kaaviot**

Kaavio 1. Muuttuvan venttiilinajoituksen luokat. (Mukaillen: Hannibal n.d.)	12
Kaavio 2. Sähkömekaanisen venttiilin iskukäyrän havainnollistus.	26

## **Kuvat**

Kuva 1. Kolmioprisamalla ohjatun venttiilin havainnollistus. (Mukaillen: Nivala & Perälä 1993, 14.)	20
Kuva 2. Sähkömekaanisen venttiilin havainnollistus. (Mukaillen: Robert Bosch GmbH 2011, 397.)	24

## **Taulukot**

Taulukko 1. Muuttuvan venttiilinohjauksen tyypit ja ominaisuudet. (Mukaillen: Hara, Suga, Watanabe & Nakamura 2009.)	13
--	----

## Sanasto ja lyhenteet

Lyhenne	Selitys
CVVT	Continuously Variable Valve Train (Jatkuvasti muuttuva venttiilien ohjausjärjestelmä)
CPS	Cam Profile Switching (Nokan profiilin vaihtelu)
DOHC	Double Overhead Camshaft (Kaksi yläpuolista nokka-akselia)
EHV	Electro-Hydraulic Valve (Sähkö-hydraulinen venttiili)
EMV	Electromechanic Valve (Sähkömekaaninen venttiili)
FVVT	Fully Variable Valve Train (Täysin muuttuva venttiilien ohjausjärjestelmä)
OHC	Overhead Camshaft (Yläpuolinen nokka-akseli)
OHV	Overhead Valve (Yläpuoliset venttiilit)
SOHC	Single Overhead Camshaft (Yksi yläpuolinen nokka-akseli)
VVA	Variable Valve Actuation (Muuttuva venttiilien ohjaus)
VVD	Variable Valve Duration (Muuttuva venttiilien aukioloaika)
VVL	Variable Valve Lift (Muuttuva venttiilien avautumiskorkeus)
VVT	Variable Valve Timing (Muuttuva venttiilien ajoitus)

# 1 Johdanto

Sähkömekaanisesti ohjattujen imu- ja pakoventtiilien avulla nelitahtisen polttomoottorin toiminta voidaan optimoida entistä paremmin erilaisiin ajotilanteisiin kaupungissa, taajamassa ja moottoritiellä. Aiheessa keskitytään sähkömekaanisesti toimivien venttiilien tuomiin hyötyihin ja haasteisiin.

Polttomoottoreihin kohdistuvat säädökset sekä tiukentuvat päästödirektiivit aiheuttavat niiden vähentymistä liikenteessä lähitulevaisuudessa. Imu- ja pakoventtiilien ohjauksen siirtymisen mekaanisista järjestelmistä sähkömekaaniseen ohjaukseen odotetaan tarjoavan ottomoottorille uusia mahdollisuuksia. Näitä ovat esimerkiksi suorituskyvyn parantuminen, polttoaineenkulutuksen laskeminen sekä hiilidioksidipäästöjen väheneminen.

Opinnäytteessä keskitytään kirjallisuuskatsaus tyyppiseen työhön, jossa hyödynnetään aiempia tutkimuksia sekä alan kirjallisuutta imu- ja pakoventtiilien täysin sähkömekaanisesta ohjauksesta ilman nokka-akselia. Tarkoituksena on syventyä aiheeseen, koota yhteen olemassa oleva tieto ja arvioida sähköisen venttiilien ohjauksen nykytilaa sekä sen mahdollisuuksia moottoriteollisuudessa tulevaisuudessa.

Aikana, jolloin tämä kyseinen opinnäytetyö on kirjoitettu, ajoneuvojen sähköistymistä sekä vaihtoehtoisia polttoaineratkaisuja on edistetty nopealla tahdilla eri autovalmistajien sekä vaikutusvaltaisten päättäjien toimesta. Kestävän kehityksen tueksi ei ole sopiva unohtaa vanhaa moottoriteknologiaa, vaan pyrkiä edistämään myös sen kehitystä.

## 2 Tavanomainen venttiilikoneisto

Sylinterinkansi on polttomoottorin olennainen osa ja se sijaitsee sylinterilohkon päällä varmistuen, että palotila on suljettu tiiviisti. Se vaikuttaa moottorin suorituskykyyn, vääntömomenttiin, päästöihin, polttoaineenkulutukseen sekä akustisiin ominaisuuksiin enemmän kuin mikään muu moottorin osa. Kannen sisällä ovat kaikki venttiilikoneiston komponentit, joiden tehtävä on ohjata palotilan kaasujen vaihtoa. (Ahonen 1998, 175; Kershaw 2023, 102.)

Henkilöautoissa yleisimmin käytössä olevia kansiventtiilikoneistotyyppisiä ovat työntötangolla ohjatut yläpuoliset venttiilit (OHV), lähes suoraan venttiilien kuppinostimiin kosketuksessa oleva yläpuolinen nokka-akseli (OHC) sekä yhdellä (SOHC) tai kahdella (DOHC) yläpuolisella nokka-akselilla toimivat venttiilikoneistot. (Haapaniemi 1978, 240-241; Ruotsalainen 2017, 19-22.)

Tärkeimpiin teknisiin ominaisuuksiin sylinterinkannessa kuuluvat imu-, pako-, voitelu- sekä jäähdytysnestekanavat. Näiden lisäksi kannessa on paikat polttoainesuuttimille sekä sytytystulpille. (Haas, Gebauer, Josef, Bonse & Krüger 2016, 169.)

Sarjatuotantohenkilöauton moottorin venttiilikoneisto on mallista riippuen jakopyörästön, nokka-akselin, lautasventtiilien ja niiden ohjureiden, nostimien sekä vivustojen muodostava kokonaisuus. Sen tehtävänä on ohjata palotilan kaasujen vaihtoa ja huuhdella sylinterin palotila uudelle polttoaine-ilmaseoslataukselle. (Ahonen 1998, 201; Haas ym. 2016, 268.)

Ottomoottorin imu- ja pakoventtiileitä ohjaa nokka-akseli, jonka kiinteät parametrit ovat ajoitus, aukioloaika sekä avautumiskorkeus. Moottorinvalmistaja valitsee valmistamalleen moottorille geometrialtaan sopivan nokka-akselin saavuttaakseen suuren huipputehon, suotuisan alakierrosväännön tai hyvän polttoainetaloudellisuuden. (Nivala & Perälä 1993, 1; Haas ym. 2016, 268; Kershaw 2023, 73.)



## 3 Venttiilien ohjausmekanismit

Tavanomaisella nokka-akselilla toimivan venttiilikoneiston lisäksi ottomoottorin imu- ja pakoventtiilejä voidaan ohjata myös hydraulisesti, pneumaattisesti, sähköisesti tai näiden yhdistelmällä. (Hannibal, Flierl, Stiegler & Meyer 2004, 12; Haas ym. 2016, 507.)

### 3.1 Mekaaninen

Mekaaninen lautasventtiilien ohjaus toteutetaan nokka-akselilla, jota kampiakseliin kiinnitetty jakopyörästä ja ajoitusketju, -hihna tai rattaat pyörittävät. Tämä on valmistuskustannusten sekä toimintavarmuuden takia vakiintunut tapa ohjata polttomoottorin venttiileitä. (Kimbrough 2013.)

### 3.2 Desmodrominen

Desmodrominen eli pakko-ohjattu venttiilien ohjaus on mekaanisesti toteutettu systeemi, jossa venttiilit suljetaan kierrejousien sijasta venttiilivipujen avulla. Massatuotantomoottoreiden sijasta tätä käytetään enimmäkseen nopeakäyntisissä kilpa-autonmoottoreissa sekä Ducatin valmistamissa korkeavirtteisissä moottoripyörissä, koska haittapuolena se aiheuttaa venttiilikoneistoon suurempia voimia, kitkaa, lämpenemistä ja kulumista. (Ahonen 1998, 26; Haas ym. 2016, 358; Ruotsalainen 2017, 22-23.)

Edellä mainittu ohjaustapa parantaa venttiilien hallintaa ja luotettavuutta, poistamalla venttiilijousien kellumisen korkeimmilla kierrosluvuilla. Se on haitallinen ilmiö, joka aiheutuu venttiilinjousen inertiaasta, eli hitaudesta palautua erittäin nopeasti pyörivän nokka-akselin takia ja sen seurauksena vaurioittaa venttiilejä, niiden istukoita sekä jousia. (Haas ym. 2016, 358; Kershaw 2023, 375.)

### 3.3 Hydraulinen

Hydraulinen venttiilien ohjaus toimii öljyllä, jossa tehonsiirtona käytetään hydraulipumpun paineistamaa nestettä. Kyseisellä venttiilien ohjausmekanismilla mahdollistetaan liikkuvien ja pyörivien massojen minimointi. Usein tällainen toimilaitte toteutetaan yhdessä sähköisen järjestelmän kanssa. (Haas ym. 2016, 279-399; Kershaw 2023, 182; Bosch GmbH 2011, 398.)

Hydrauliikalla toimivia venttiilien ohjaustoimilaitteita käytetään merialusten dieselmootoreissa hitaamman käyntinopeuden vuoksi. Erityisesti hydrauliikkaa kuitenkin käytetään kuppinnostimien sekä tapettiohjattujen venttiilinnostajien väläkyksenpoistajana. (Eerola 1978, 448; Söderback, Valkjärvi, Storm, Saine & Mikulski 2023.)

### 3.4 Pneumaattinen

Pneumaattisesti ohjatut venttiilit toimivat ilmalla, jossa voimansiirto tapahtuu paineistetun kaasun avulla. Ominaisuuksiltaan sillä saavutetaan samanlaiset edut kuin hydraulisella ohjauksella, eli liikkuvien osien vähentynyt massa.

Pneumatiikka ei yksinään ole erityisen yleinen tapa ohjata polttomoottorin venttiileitä, koska se tarvitsee kompressorin tai erillisen säiliön kaasulle, jolloin sen hyödyntäminen polttomoottorin venttiilien ohjauksessa käy hankalaksi. Sitä kuitenkin hyödynnetään lautasventtiilien jousien tilalla painon sekä kellumisilmiön vähentämiseksi esimerkiksi Formula 1 -luokan kilpa-autoissa sekä MotoGP-sarjan ratamoottoripyörissä. (Pneumatic Valve Actuation n.d.)

Rakenteeltaan pneumaattinen jousi on männän ja sylinterin tavoin liikkuva metallipalje, joka tuottaa progressiivisen jousimaisen voiman. Kaasuna siinä käytetään paineistettua typpeä, koska se kestää hyvin lämpöä, on paloturvallinen ja poistaa vesihöyryn ja hapen aiheuttamat paineenvaihtelut. (SCARBSF1 n.d.)

### 3.5 Sähköinen

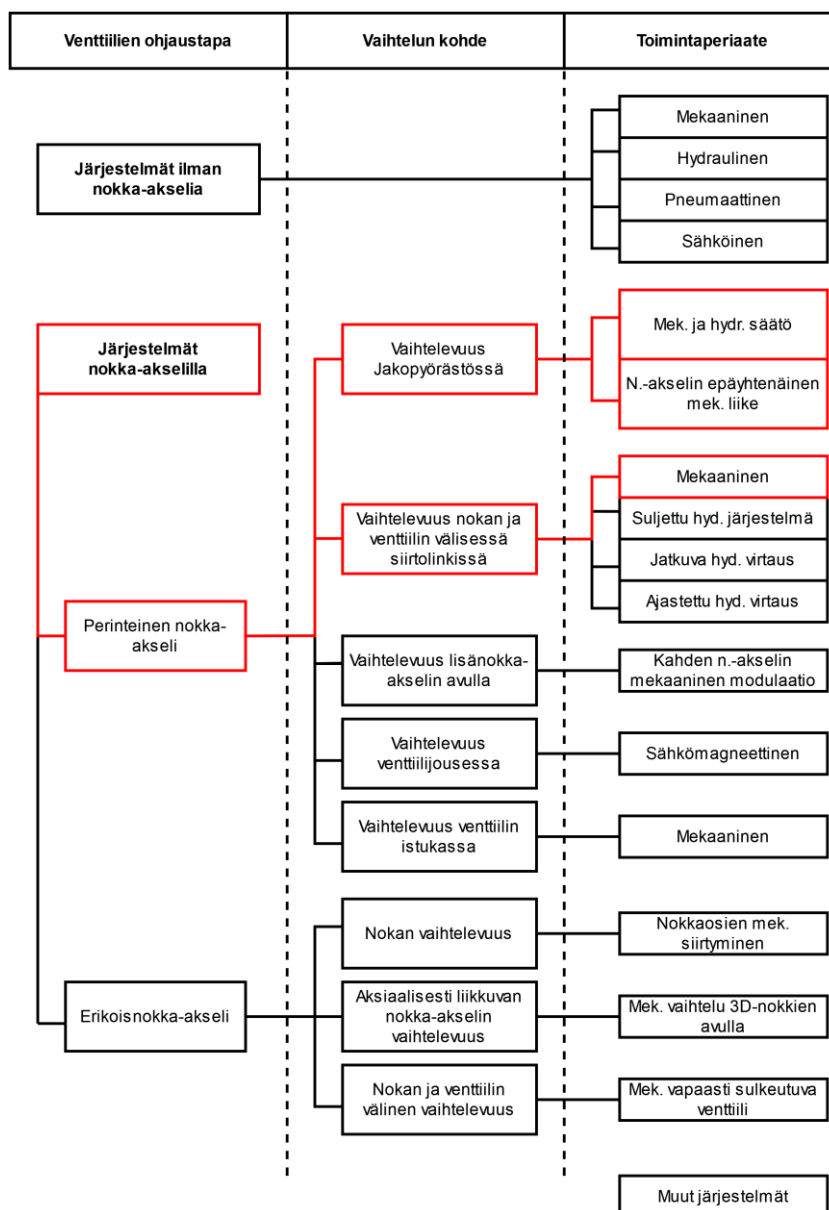
Sähköinen venttiilien ohjaus toteutetaan solenoidien eli sähkömagneettisten kelojen avulla perinteisen mekaanisen nokka-akselin sijaan. Venttiilin asennon vaihtaminen tapahtuu asettamalla sähkömagneetti jännitteelliseksi, jolloin sen ferriittinen ankkuri liikkuu lineaarisesti käämin sisälle, kun siihen kytketään riittävän suuri sähkövirta. Venttiili pysyy jousien avulla keskiasennossa, kun sähkömagneetit ovat jännitteettömiä. (Solenoid Valves 101 2013.)

Järjestelmä voidaan toteuttaa myös harjattomalla tasavirtamoottorilla, joka käyttää kampia liikuttavaa ohjaustankomekanismia muuntamaan pyörivän liikkeen venttiilille sopivaksi lineaariseksi liikkeeksi. (Jiang, Liu, Peng & Xu 2020.)

Sähkömekaaniseen venttiilien ohjaustoimilaitteeseen on usein integroitu hydraulikkaa sekä pneumatiikkaa, ja sen toteutustavoista on erilaisia näkemyksiä moottorivalmistajien keskuudessa. Täysin sähköinen venttiilien ohjaus on vielä kehitteillä, eikä sitä siksi esiinny vielä laajasti sarjatuotannossa. (Robert Bosch GmbH 2011, 397.)

## 4 Muuttuva venttiilien ohjaus

Muuttuvalla venttiilin ohjauksella (VVA) tarkoitetaan tekniikkaa, jolla voidaan reaaliajassa muuttaa venttiilien ajoitusta, aukioloaikaa sekä avautumiskorkeutta ajon aikana. Muuttuvat venttiilien ohjaustekniikat voidaan jakaa kahteen pääryhmään, nokka-akselilla toimiviin järjestelmiin sekä nokka-akselittomiin. Näistä kahdesta jalkautuu alaryhmiin (kaavio 1) yhteensä 17 erilaista venttiilien ajoitusta muuttavaa järjestelmää (VVT). (Hannibal n.d.)



Kaavio 1. Muuttuvan venttiilinajoituksen luokat. (Mukaillen: Hannibal n.d.)

Sarjatuotantomootoreissa käytetään pääsääntöisesti vain nokka-akselilla toimivia järjestelmiä, jotka ovat merkitty kaavioon punaisella (kaavio 1). Venttiilien parametrejä säädetään joko jakopyörästössä olevilla kytkimillä tai mekaanisesti nokan ja venttiilien välisillä siirtolinkeillä. Jakopyörästössä nokka-akselin vaiheistus toteutetaan mekaanisesti, hydraulisesti tai sähköisesti. Näillä tekniikoilla vaikutetaan venttiin iskukäyrään eritavoin (taulukko 1). (Hannibal ym. 2004, 12.)

Taulukko 1. Muuttuvan venttiilinohjauksen tyypit ja ominaisuudet. (Mukailleen: Hara, Suga, Watanabe & Nakamura 2009.)

Typpi		Venttiilien iskukäyrät		Ajoitus	Korkeus	Aukioloaika	Deaktivaatio	Jatkuva ohjaus	Moottorin suorituskyky	Asennus	Kustannus
		Pako	Imu								
Toiminta nokka-akselilla	Ajoituksen säätö (VVT)			○	✗	✗	✗	○	Matala	Hyvä	Matala
	Segmentoitu nokka-akselin profiili (CPS)			◇*	○	○	○	✗◇*	↓	↑	↑
	Aukioloajan ja korkeuden säätö (VVL)			◇*	○	○	○	○			
	Aukioloajan säätö (VVD)			◇*	✗	○	✗	○			
Ilman nokka-akselia	Sähkö-/hydraulinen venttiili (EMV/EHV)			○	○	○	○	Korkea			
Selitykset:				○ Mahdollinen ◇ Osittain mahdollinen ✗ Ei mahdollista		*Lisätoiminnot mahdollisia yhdistämällä venttiilien ajoitussäätö.					

Muuttuvaa venttiilien ohjausta käytetään lähtökohtaisesti vain imuventtiilien puolella sen tuoman suuremman hyödyn sekä alhaisempien valmistuskustannuksen vuoksi. Yllä olevasta taulukosta (taulukko 1) huomataan eri tekniikoiden tuovan moottorille sekä edullisia että epäedullisia ominaisuuksia. Sähköinen venttiilien ohjaus tarjoaa kuitenkin parhaimmat säätömahdollisuudet.

Muuttuvalla venttiilien ohjauksella on suuri merkitys tulevaisuuden päästömääräysten täyttämiseksi. Polttoaineenkulutuksen vähentämiseksi bensiinimoottoreissa käytetään yhä enemmän erilaisia venttiilien toimintaan vaikuttavia tekniikoita ja niiden toteutustapoja on lukuisia. (Haas ym. 2016, 278.)

#### 4.1 Muuttuva venttiilien ajoitus

Venttiilien ajoitus on parametri, joka kuvaa nokka-akselin vaihekulmaa suhteessa kampiakseliin. Venttiilien ajoitusta säädetään, jotta moottorin tehoalue parantuu halutulle kierroslukualueelle. Ajoituksen aikaistaminen lisää vääntöä matalilla kierroksilla ja myöhäistäminen lisää tehoa korkeimmilla. (Kershaw 2023, 359-360.)

Venttiilien ajoitus on aina kompromissi suhteessa moottorin käyttötarkoitukseen. Tästä syystä on kehitetty järjestelmiä, jotka pystyvät muuttamaan ajoitusta ajon aikana. Käytössä olevat järjestelmät toimivat pääsääntöisesti mekaanisesti, hydraulisesti, sähköisesti sekä niiden yhdistelmällä. (Haas ym. 2016, 490.)

Muuttuvalla venttiilien ajoituksella (VVT) mahdollistetaan kattavampi imu- sekä pakovernttiin samanaikainen aukioloaika eli peitto, jolloin sylinterin palotilaan saadaan tehostettu huuhtelu. Tällöin työtahdin jälkeiset pakopuolelle ohjautuvat kaasut auttavat vetämään imupuolelta uutta ilmaa. (Eerola 1978, 422; Kershaw 2023, 244-359.)

Huuhtelun riskinä on kuitenkin palamattoman polttoaineen kulkeutuminen pakoputkistoon, aiheuttaen tehohäviöitä ja lisäpäästöjä. (Haas ym. 2016, 521). Pahimmassa tapauksessa korkeapaineinen pakokaasu voi työntyä sylinteristä imusarjaan huonontaen sylinterin täyttöä ja lisäten jäännöskaasupitoisuutta. (Nivala & Perälä 1993, 2).

Koska muuttuva venttiilien ajoitus tarjoaa edellä mainittuja hyötyjä, käytetään sitä lähes kaikissa moderneissa moniventtiilisissä bensiinimoottoreissa. Erityyppisistä ajoitusjärjestelmistä on tehty patenttihakemuksia yli 7 500 kappaletta vuosien 1990 ja 2003 välillä, joka osoittaa moottorivalmistajien suuren kiinnostuksen kyseiseen teknologiaan. (Haas ym. 2016, 535.)

#### 4.2 Muuttuva venttiilien aukioloaika

Venttiilien aukioloaika on parametri, joka kertoo sen avautumis- ja sulkeutumishetken välillä, kuinka kauan venttiili on auki. Kesto mitataan siitä hetkestä, kun venttiili alkaa juuri avautua, siihen hetkeen, kun venttiili on juuri sulkeutumassa. (Kershaw 2023, 123.)

Suurilla pyörimisnopeuksilla toimiessaan moottori tarvitsee paljon ilmaa, mutta imuventtiilit saattavat kuitenkin sulkeutua ennen kuin ilmaa on riittävästi päässyt jokaiseen palotilaan, mikä heikentää moottorin suorituskykyä. Toisaalta, jos nokka-akseli pitää venttiilit auki liian kauan, alkaa ongelmia ilmetä moottorin alhaisilla pyörimisnopeuksilla. (Haas ym. 2016, 521.)

Siksi muuttuvalla venttiilien aukioloaikaa (VVD) säätävällä tekniikalla voidaan määrittää, kuinka kauan venttiili pysyy ajon aikana auki. Pidempi aukioloaika saattaa lisätä tehoa korkeimmilla pyörimisnopeuksilla, mutta samalla heikentää vääntöä matalilla pyörimisnopeuksilla. (Grant 2021.)

### 4.3 Muuttuva venttiilien avautumiskorkeus

Venttiilin avautumiskorkeus määrittää, kuinka paljon ilmaa virtaa sylinteriin ja paljonko pakokaasuja voi virrata sieltä ulos. Venttiilin iskunpituuden lyhentäminen on yksi tapa parantaa virtaavan kaasun pyörteisyyttä ja parantaa polttoaine-ilmaseoksen muodostumista alhaisilla kierrosnopeuksilla. Venttiilin nousu- ja ajoitusparametrit ovat tärkeitä optimoida tarkasti, jotta muut moottorin ominaisuudet, kuten teho ja päästöt pysyvät korkeilla pyörimisnopeuksilla hallinnassa. (Kershaw 2023, 211).

Muuttuvalla venttiilien avautumiskorkeudella (VVL) tarkoitetaan ominaisuutta, jolla venttiilin iskunpituutta voidaan säätää ajon aikana, riippumatta kampiakselin asennosta. Säädettävä avautumiskorkeus parantaa moottorin tehokkuutta ja polttoaineen käyttöä erityisesti vaihtelevilla kuormituksilla ja pyörintänopeuksilla. Lisäksi se voi vähentää päästöjä ja parantaa moottorin käyttöikää optimoimalla venttiilien ajoitusta ja moottorin ilmanvirtausta eri käyttöolosuhteissa. (Haas ym. 2016, 521-535.)



## 5 Täysin muuttuva venttiilien ohjaus

Täysin muuttuva venttiilien ohjaus (FVVT) tai toiselta nimeltään tunnettu jatkuvasti muuttuva venttiilien ohjaus (CVVT) on tekniikka, jolla mahdollistetaan lautasventtiilien lähes rajoittamaton ohjaus ajon aikana. Venttiilien avautuminen voidaan optimoida kaikkiin ajotilanteisiin, riippumatta moottorin kuormituksesta tai pyörimisnopeudesta, mikä parantaa moottorin suorituskykyä ja polttoainetaloudellisuutta merkittävästi. (Haas ym. 2016, 521.)

Täysin muuttuva venttiilien ohjauksen perimmäinen idea on ollut olemassa niin kauan kuin itse moottorisuunnittelukin. Sen juuret ulottuvat vuoteen 1902, jolloin ensimmäiset konseptit kehitti Louis Renault. Lähes kaikki suuremmat autovalmistajat ovat pyrkineet kehittämään venttiilikoneistoa, joka mahdollistaisi venttiilien ohjausparametrien muuttamisen ajon aikana. (Haas ym. 2016, 521; Hannibal ym. 2004, 13.)

Varhaiset säätöjärjestelmät toimivat porrastetusti, jolloin moottorissa käytettiin matalilla ja keskinopeilla kierroksilla yhtä ajoitusta ja toista ajoitusta korkeilla kierroksilla. Portaattomasti säädettävä venttiilien ajoitus tarjoaa kuitenkin laajemman säätöalueen. (Haas ym. 2016, 521.)

Seuraavissa osioissa käsitellään esimerkkejä järjestelmistä, jotka mahdollistavat venttiilien säätämisen portaattomasti erilaisten mekaanisten, hydraulisten ja sähkömekaanisten ratkaisujen avulla ja jotka toimivat nokka-akselilla tai ilman.

## 6 Venttiilien portaaton säätäminen

Portaaton säätötekniikka mahdollistaa venttiilien tarkan säätämisen moottorin eri käyttötilanteissa. Sillä voidaan melko joustavasti muuttaa venttiilien ajoitusta, aukioloaikaa ja aukiolokorkeutta reaaliaikaisesti, mikä parantaa moottorin suorituskykyä, polttoainetaloudellisuutta ja vähentää aiheutuvia päästöjä.

Tällaisissa säätöjärjestelmissä käytetään mekaanisia, hydraulisia, pneumaattisia sekä sähköisiä ratkaisuja. Mekaanisesti toimivien järjestelmien säätömekanismit aktivoidaan usein hydraulisesti tai sähköisesti. Täysin hydraulisissa ja sähköisissä ohjausjärjestelmissä venttiilien säätäminen voidaan toteuttaa myös ilman nokka-akselia.

### 6.1 Nokka-akselin vaiheistin

Nokka-akselin vaiheistimella säädetään nokka-akselin ajoitusta laajalla kulma-alueella. Yksinkertaisia kaksitilaisia vaiheistimia on käytetty moottoreissa 1980-luvun puolivälistä lähtien. Nykypäivänä vaiheistimen säätö toimii portaattomasti ja on hydraulisi- tai sähkökäyttöinen. Säätäminen toimii usein suljetulla silmukalla, jolloin nokka-akselin todellista asentoa mitataan jatkuvasti ja sitä verrataan haluttuun asentoon. (Haas ym. 2016, 278-515.)

Vaiheistimella mahdollistetaan venttiilien yhtäaikaisen aukioloajan säätämisen DOHC-moottoreissa, vaikuttaen palotilan huuhteluun ja jäännöskaasujen määrään. Lisäksi ajoitusta voidaan optimoida tyhjäkäynnille sekä täyskaasulle maksimaalisen väännön ja suorituskyvyn saavuttamiseksi. (Haas ym. 2016, 278-410.)

Nokka-akselin vaiheistimia käytetään pääasiassa imunokka-akselilla, ja niiden tyypilliset säätökulmat ovat 40-60 kampiakselin astetta. Turboahdettujen moottoreiden yhteydessä käytetään vaiheistimia myös pakokaasupuolella. Molemmat säätömahdollisuudet voidaan yhdistää, kun vaaditaan huippuluokan suorituskykyä ja pakokaasujen laatua. (Haas ym. 2016, 278.)

## 6.2 Aksiaalisesti siirrettävä nokka-akseli

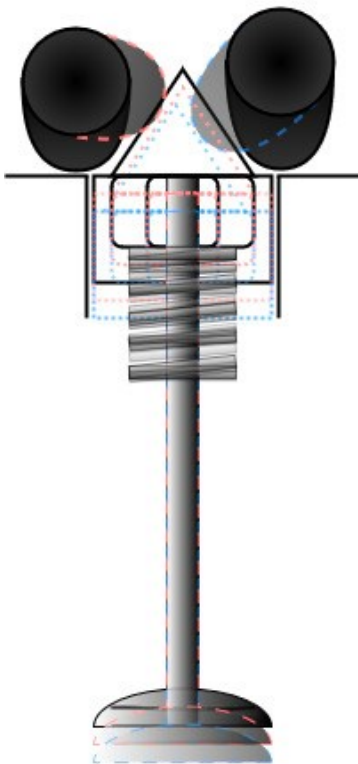
Aksiaalisesti liikuteltava nokka-akseli tarjoaa venttiilien ajoituksen ja noston tarkan säätämisen. Järjestelmä perustuu aksiaalisesti liikuteltavaan nokka-akseliin, jonka kartionmuotoiset nokat mahdollistavat venttiilin avautumiskorkeuden säätämisen ajon aikana. Tämä saavutetaan erikoiskoneistetun nokka-akselin avulla, joka on yhdistetty venttiilin nostinkupin päällä keinuvaan seuraajalevyyn. Venttiilivälykset säädetään nostinkupin ja seuraajan välissä olevilla säätölevyillä. (Nivala & Perälä 1993, 13.)

Järjestelmässä käytetään keskipakosäätöistä öljynpaineella toimivaa säädintä, joka siirtää nokka-akselia portaattomasti. Tämä säätö on lineaarisesti riippuvainen moottorin kierrosluvusta, mikä takaa tarkan ja dynaamisen säädön. Rakennetta voidaan hyödyntää säätämään sekä imu- että pakoventtiilien nostoa, ja siihen voidaan lisäksi integroida vinohammastuksella toteutettu ajoituksensäätö. (Nivala & Perälä 1993, 13.)

Tämä järjestelmä tarjoaa merkittäviä etuja moottorin suorituskyvyn ja polttoainetalouden parantamisessa, joka mahdollistaa moottorin paremman hallinnan erilaisissa ajotilanteissa. (Nivala & Perälä 1993, 13; Sebasti, Prof & Wensing 2010.)

### 6.3 Kolmioprisma

Ricardon teknillisen tutkimuslaitoksen kehittämä prismaohjattu venttiili on suunniteltu erityisesti nopeakäyntisiin ja suuritehoisiin moottoreihin. Järjestelmä koostuu kolmion muotoisesta kappaleesta, joka liikuu venttiilinpainimen päällä olevissa urissa. Lisäksi järjestelmässä on kaksi nokkaa, joiden nokkaprofiilit ovat erilaiset (kuva 1). (Suomen autolehti 1991, 6, Nivala & Perälä 1993, 14 mukaan.)



Kuva 1. Kolmioprisamalla ohjatun venttiilin havainnollistus. (Mukaillen: Nivala & Perälä 1993, 14.)

Säätö tapahtuu muuttamalla nokkien keskinäistä vaihetta portaattomasti. Tämä mahdollistaa venttiilin ajoituksen säätämisen sekä venttiilin kokonaisaukioloajan ja -nousun optimoinnin moottorin tarpeiden mukaan. Ricardon mukaan menetelmä tarjoaa tehokkaan ratkaisun moottorin suorituskyvyn parantamiseen säätämällä venttiilien toimintaa dynaamisesti eri käyttötilanteissa. (Suomen autolehti 1991, 6, Nivala & Perälä 1993, 14 mukaan.)

#### 6.4 Säädetävät venttiilien paininvivut

Venttiilin paininvipu on komponentti, joka on lautasventtiilin sekä nokka-akselin välissä voiman välittäjänä. Paininvipu muuntaa nokka-akselin pyörivän liikkeen ylösalaiseksi liikkeeksi, jolloin venttiili avautuu ja sulkeutuu. Vivun asentoa ja liikettä voidaan muuttaa lukuisilla erilaisilla ratkaisuilla, mutta periaate on niissä kaikissa sama. Portaattomasti säädetävillä venttiilien paininvivuilla voidaan muuttaa ajoitusta, aukioloaikaa sekä avautumiskorkeutta, riippuen sen konfiguraatiosta. Säättömekanismi voidaan aktivoida hydraulisesti, sähköisesti tai mekaanisesti ajon aikana moottorin toiminnan optimoimiseksi. (ECC 2024; Nivala & Perälä 1993, 14-19; Hannibal ym. 2004, 14-16.)

#### 6.5 Kierteinen nokka-akseli

Kierukkamainen nokka-akseli on mekaaninen ratkaisu, joka mahdollistaa venttiilien aukioloajan portaattoman säädön moottorin käyntiolosuhteiden mukaan. Tämä tarkoittaa, että nokka-akselin profiili on suunniteltu niin, että sen aikaansaama venttiilien avautumis- ja sulkeutumisaikajankohda voidaan muuttaa ilman perinteisen nokka-akselin rajoitteita. (IdeaConnection n.d.)

Kierukkamaisessa nokka-akselissa venttiilien aukioloaika riippuu nokka-akselin kiertokulmasta suhteessa kampiakseliin. Tyypillisesti aukioloaika voi vaihdella 250 asteesta yli 350 asteeseen kampiakselin pyörimisestä riippuen. Tämä laaja kestoalue mahdollistaa optimaalisen venttiilinohjauksen eri moottorin käyntiolosuhteissa, kuten eri kierrosnopeuksilla ja kuormitustasoilla. (IdeaConnection n.d.)

Kierukkamaisen nokka-akselin käyttö tarjoaa useita etuja perinteiseen nokka-akseliin verrattuna, kuten paremman moottorin tehon ja vääntömomentin hyödyntämisen laajalla kierrosnopeusalueella. Lisäksi se voi parantaa polttoaineenkulutusta ja vähentää päästöjä optimaalisen ajoituksen ja virtauksen hallinnan avulla sylinterissä. (IdeaConnection n.d.)

## 6.6 Nokka-akselittomat säätöjärjestelmät

Venttiilien säätäminen portaattomasti ilman nokka-akselia vähentää liikkuvia massavoimia ja avaa uusia mahdollisuuksia venttiilien täydelliselle ohjaukselle. Venttiilien ohjaus sähkö-hydraulis-pneumaattisesti, joko yksinään tai yhteiskäytöllä mahdollistaa osiossa 4 läpikäytyjen parametrien laajat säätömahdollisuudet.

### 6.6.1 Hydraulinen

Hydraulisesti toimiva venttiilien ohjausjärjestelmä toimii kuten luvussa 3.3 tuotiin ilmi. Se eliminoi tarpeen perinteiselle nokka-akselille ja mahdollistaa portaattoman venttiilien säädön. Hydraulinen säätötekniikka kuluttaa vain vähän sähköä verrattuna täysin sähköiseen järjestelmään, mutta pystyy silti käsittelemään suuria voimia ja paineita, mikä tekee siitä tehokkaan ja monipuolisen ratkaisun.

Toisaalta hydraulinen venttiilien säätötekniikka lisää järjestelmän kompleksisuutta, jolloin huolto- ja ylläpitokustannukset ovat korkeat. Järjestelmän herkkyys öljyn lämpötilan ja viskositeetin muutoksille vaikuttavat järjestelmän toimintaan ja luotettavuuteen, mikä on otettava huomioon.

### 6.6.2 Pneumaattinen

Pneumaattisesti ohjatut venttiilit tarjoavat teoriassa vastaavat säätöominaisuudet, kuin hydraulinenkin järjestelmä. Mutta kuten luvussa 3.4 mainittiin, sitä ei yksinään käytetä venttiilien ohjaustekniikkana. Sitä voidaan kuitenkin hyödyntää sähköisten sekä hydraulisten venttiilien ohjaus- ja säätöjärjestelmien rinnalla.

### 6.6.3 Sähköinen

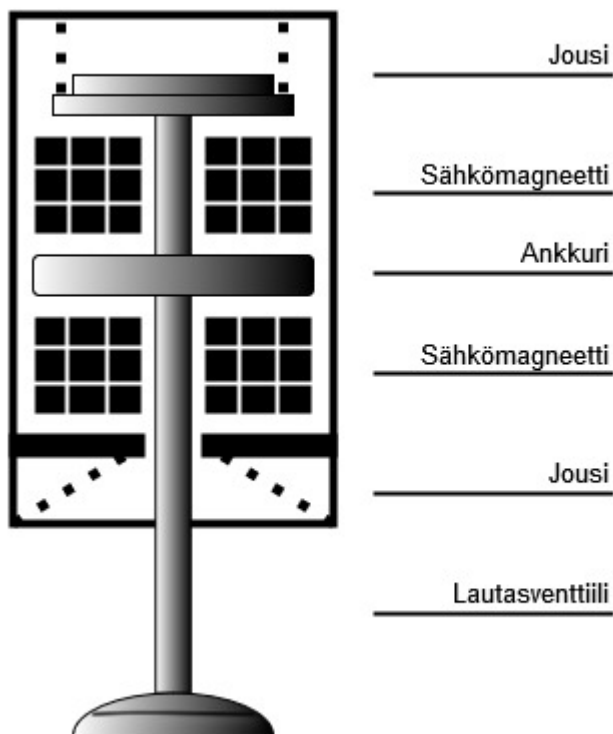
Sähköisesti toteutettu venttiilien ohjaustekniikka toimii, kuten luvussa 3.5 kerrottiin. Järjestelmällä on mahdollista toteuttaa venttiilien parametrien täysin portaaton säätäminen ilman perinteistä nokka-akselia. Sähköisten säätöjärjestelmien tarkkuus ja nopeus reagoida välittömästi moottorin ohjausyksikön komentoihin mahdollistaa monimutkaisten ajoitusten ja aukioloaikojen muutosten reaaliaikaisen hallinnan. Lisäksi järjestelmän vähäinen mekaanisten osien määrä pienentää moottorin kokoa, painoa ja yksinkertaistaa sen rakennetta. Toisaalta sähköisesti toimiva venttiilien säätöjärjestelmä voi olla altis sähköhäiriöille ja vaatii jatkuvaa virransyöttöä toimiakseen luotettavasti. Tämä tarkoittaa, että tehokas sähköjärjestelmä on välttämätön.

### 6.6.4 Yhdistelmä

Lähes kaikissa yllä esitetyissä venttiilien portaattomissa säätöjärjestelmissä on hyödynnetty kunkin tekniikan parhaita puolia, mikä mahdollistaa venttiilien tarkan ja joustavan säädön erilaisissa moottorin käyttötilanteissa. Tällaiset sähkö-hydraulis-pneumaattis-mekaaniset järjestelmät tarjoavat moottorille teoriassa erinomaisen suorituskyvyn ja polttoainetaloudellisuuden. Ilman nokka-akselia toimivia säätöjärjestelmiä on kaupallistettu, mutta ne eivät ole vielä yleistyneet tai päätyneet sarjatuotantomootoreihin. Tästä eteenpäin keskitytään syvemmin venttiilien täysin sähköiseen ohjaustekniikkaan, sen tuomiin hyötyihin ja haasteisiin.

## 7 Sähkömekaanisen venttiilin tekninen kuvaus

Sähkömekaaninen venttiili (EMV) on sähkömagneetilla eli solenoideilla toimiva aktuaattori, joka säätelee kaasujen virtausta sylinterin palotilaan ja sieltä pois. Yksinkertaisimmillaan yksittäinen lineaarisesti toimiva aktuaattori koostuisi kuudesta eri komponentista (kuva 2). Ylä- ja alapuolisesta jousesta, avaavasta ja sulkevasta sähkömagneetista, ankkurista sekä lautasventtiilistä. (Robert Bosch GmbH 2011, 397.)



Kuva 2. Sähkömekaanisen venttiilin havainnollistus. (Mukaillen: Robert Bosch GmbH 2011, 397.)

Lautasventtiili avataan ja suljetaan riippuen aktivoituneesta sähkömagneetista. Moottorissa toimiessaan aktuaattori tarvitsee lisäksi asentotunnistimen, virtalähteen sekä erillisen venttiilien ohjausyksikön, joka kommunikoi ajotietokoneen kanssa.



Tiettyjen kriteerien on täytyttävä, jotta tavallinen venttiilikoneisto voidaan korvata sähkömekaanisesti ohjatuilla venttiileillä. Ensinnäkin toimilaitteen tulee mahdollistaa täysin säädettävä venttiilien ohjaus, jolloin venttiilin ajoitusta, venttiilin aukioloaikaa sekä venttiilin aukiolokorkeutta voidaan muuttaa ajotilanteesta riippumatta.

Toiseksi, moottorin korkeiden kierroslukujen saavuttamiseksi järjestelmän on saavutettava vähintään 3,5 millisekunnin siirtymäaika, kun venttiilin avautumiskorkeus on 8 millimetriä ja sen iskunpituus on oltava säädettävissä eri kierrosluvuilla. (Lu & Chang 2019.)

Kolmanneksi, jotta venttiilin käyttöikä saadaan maksimoitua ja toimintamelu minimoitua, on olennaista, että toimilaitte ohjaa venttiilin pehmeään laskeutumisen istukkaan alle 0,1 millisekunnissa.

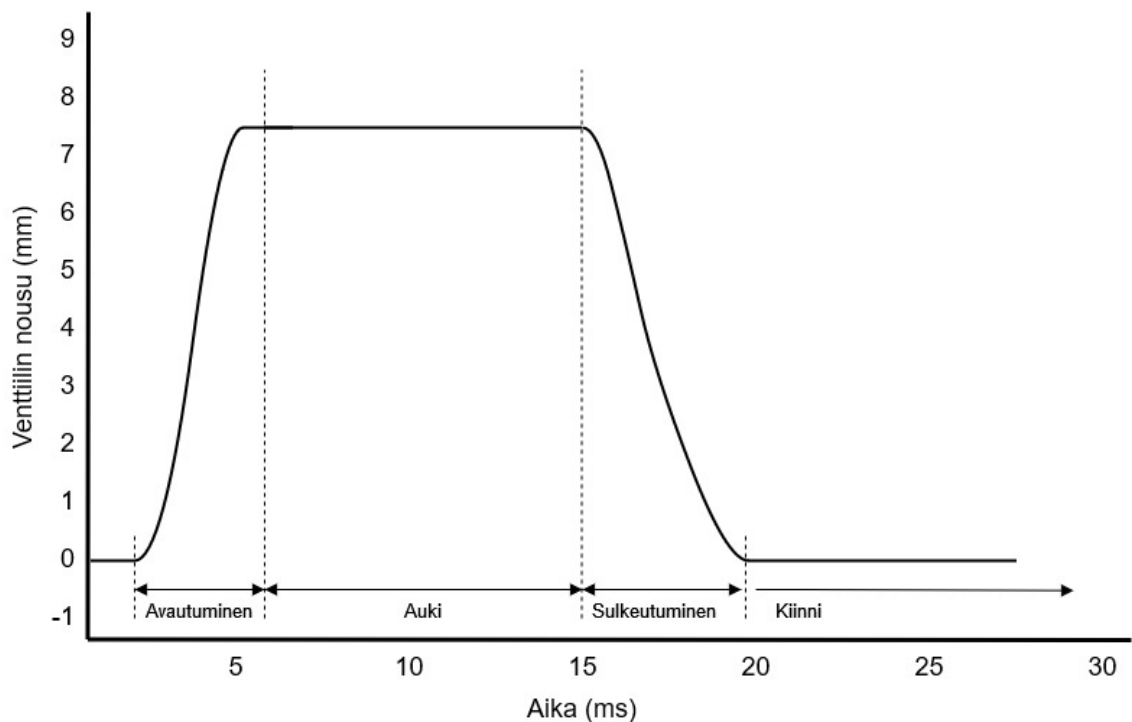
Neljänneksi, toimilaitteen on oltava erittäin kestävä, ja se edellyttää laadukkaita materiaaleja, sillä venttiili altistuu kitkalle, kulutukselle ja korkeille lämpötiloille. (Lu & Chang 2019.)

Kun edellä mainitut kriteerit täyttyvät, sähkömekaaninen venttiilien ohjaus tarjoaa selvästi monipuolisemmat säätömahdollisuudet verrattuna nokka-akselilla toimivaan venttiilikoneistoon, jossa mekaanisilla säätimillä voidaan muuttaa vain yksittäisiä parametrejä.

## 8 Sähkömekaanisen ohjauksen tuomat edut

Sähköisellä venttiiliohjauksella saavutetaan reaaliaikaisesti täysin vapaasti kontrolloitava toiminta-alue ja moottorin optimointi sen parhaimman tuottavan suorituskyvyn mukaisesti. Pienellä kuormituksella moottoria voidaan käyttää osasyntereillä, jolloin moottorin kokonaisiskutilavuus muuttuu näennäisesti ajon aikana. Tämä luonnollisesti vähentää polttoaineen kulutusta ja aiheutuvia päästöjä.

Sähkömekaanisella toimilaitteella ohjattu venttiili voidaan avata ja sulkea millisekunneissa, mikä mahdollistaa sylinterin palotilan paremman huuhtelun ja lisää ilmanottoa moottorin korkeimmilla pyörimisnopeuksilla. Toisin kuin nokka-akselilla ohjatut venttiilit, jotka ovat riippuvaisia nokan jyrkkyydestä, sähköisesti ohjattu venttiili liikkuu lähes välittömästi liikeratansa ääripäihin (kaavio 2).



Kaavio 2. Sähkömekaanisen venttiilin iskukäyrän havainnollistus.

Sähköinen venttiilien ohjaus tarjoaa parhaimmat säätömahdollisuudet muihin järjestelmiin verrattuna, kuten luvun 4 taulukossa 1 havainnollistettiin.

Sähkömekaanisella venttiilien ohjauksella on mahdollista toteuttaa venttiilien parametrien täysin portaaton säätäminen ilman perinteistä nokka-akselia.

Sähköisten säätöjärjestelmien tarkkuus ja nopeus reagoida välittömästi moottorin ohjausyksikön komentoihin mahdollistaa monimutkaisten ajoitusten ja aukioloaikojen muutosten reaaliaikaisen hallinnan sekä tarjoaa täysin uusia mahdollisuuksia kehittää polttomoottorien kaasujenvaihtoa. (Denger & Mischker 2005.)

Tavallinen nokka-akselilla toimiva moottori voidaan optimoida vain tietylle käyntialueelle, mutta sähkömekaanisesti toteutetulla ohjauksella jokainen venttiili voidaan aktivoida toisistaan riippumatta vähentäen samalla liikkuvia massavoimia, jolloin moottorikonstruktio on kokonaisuudessaan kevyempi ja pienempi. (Design Group, 2018; Eerola 1976, 197.)

Lisäksi järjestelmällä on mahdollista vähentää pumppaushäviöitä ja toteuttaa Miller-toimintasykli, joka on ahdetun moottorin hyötysuhdetta parantava tekniikka, jossa imuventtiili suljetaan myöhemmin kuin normaalisti. Tämä johtaa korkeampaan puristussuhteeseen ja parantaa polttoaineen hyötykäyttöä sekä mahdollistaa korkean etanolipitoisuuden omaavien polttoaineiden tehokkaamman käytön. (Klose 2019; Turner, Babbitt, Balton, Raimao & Giordano 2004, 33; Freevalve AB 2004.)

Sähköisellä ohjausjärjestelmällä saavutetaan myös merkittävä parannus nokka-akselin aiheuttamiin energiahäviöihin, kuten kitkavoimiin sekä venttiilijousen kokoon puristamiseen tarvittaviin voimiin. Lineaarisen venttiilinjousen kokoon puristamiseen tarvittava voima voi vaihdella kymmenistä satoihin newtoneihin, riippuen jousen jäykkyydestä ja puristusmatkasta (Eerola 1978, 450). Tämä voima muodostaa merkittävän osan mekaanisista häviöistä perinteisissä venttiilijärjestelmissä, joita sähkömekaanisella ohjauksella voidaan vähentää.

## 8.1 Vääntömomentti

Sähkömekaanisesti toteutetulla muuttuvalla venttiilien ohjauksella on mahdollista parantaa moottorin alhaisen pyörimisnopeuden vääntömomenttia tehostamalla seoksen muodostumista riittävällä pyörteisyydellä. Tehokas pyörteisyys saavutetaan suurella polttoaine-ilmaseoksen virtausnopeudella ja se voidaan toteuttaa venttiilien aukioloaikaa lyhentämällä, ajoitusta myöhäistämällä tai imuventtiilin aukiolokorkeutta pienentämällä (Kershaw 2023, 211).

Moottorin keskivaiheen pyörimisnopeuksilla sähkömekaaninen venttiilien ohjaus voi säätää venttiilien parametreja siten, että saavutetaan optimaalinen palamislämpötila ja polttoaine-ilmaseoksen suhde. Tällöin palamisprosessin tehokkuuden maksimointi johtaa korkeaan vääntömomenttiin laajalla pyörimisnopeusalueella.

Suurilla pyörimisnopeuksilla perinteisen moottorin tehokkuus usein laskee, mutta sähköisesti toteutettu ohjaus säätää venttiilien parametreja reaaliajassa, optimoiden ilmavirran ja polttoaineen syötön, jolloin vääntömomentti pysyy korkealla ja ehkäisee suorituskyvyn heikkenemistä.

Mekaanisilla muuttuvan venttiilienohjauksen tekniikoilla vääntömomenttiin on saatu noin 3-14 prosentin nousu (Nivala & Perälä 1993). Sähköisellä venttiilien ohjauksella vääntömomentti on jopa 5-20 prosenttia suurempi perinteiseen nokka-akselilla varustettuun moottoriin verrattuna (Qiu 2010). Freevalve AB (2024) väittää taas onnistuneensa lisäämään moottoriin vääntömomenttia jopa 47 prosenttia kehittämällänsä sähkö-hydraulis-pneumaattisesti toimivalla venttiilien ohjaustoimilaitteella. (Freevalve AB 2024).

## 8.2 Teho

Matalilla ja keskikierröksillä sähkömekaanisen ohjauksen mahdollistamalla tarkalla venttiilien säädöllä parannetaan moottorin hyötysuhdetta, mikä johtaa tasaisempaan ja korkeampaan tehoon verrattuna perinteiseen nokka-akseliin. Tämä mahdollistaa ajoneuvon paremman kiihtyvyyden ja ajettavuuden.

Korkeilla pyörimisnopeuksilla moottorin teho rajoittuu yleensä venttiilien kykyyn avautua ja sulkeutua riittävän nopeasti. Sähkömekaanisella venttiilien ohjauksella mahdollistetaan venttiilien optimaalinen säätäminen, jolloin palamisprosessi pysyy sylinterissä tehokkaana ja teho säilyy korkeana pidempään moottorin pyörintänopeuden kasvaessa.

Sähkömekaanisen venttiilikoneiston tuoma tehonlisäys on monissa lähteissä todettu olevan noin 20 prosenttia perinteiseen nokka-akselilla toimivaan moottoriin verrattuna (Denger & Mischker, 2005). Freevalve AB (2024) väittää onnistuneensa lisäämään moottoriin tehoa jopa 45 prosenttia kehittämällään sähkö-hydraulis-pneumaattisella aktuaattorilla. (Freevalve AB 2024).

## 8.3 Kulutus

Kun moottorin hyötysuhde nousee ja palamisprosessi optimoidaan kaikilla moottorin pyörimisnopeuksilla, vähenee myös polttoaineenkulutus. Ilman nokka-akselia toimivaa moottoritekniologiaa kehittäneet yritykset väittävät, että polttoaineen kulutusta voitaisiin vähentää jopa 20 prosenttia normaalissa ajosykliissä (Elmagdoub, Möller, Carlson, Brace, Akehurst, Turner & Zhang 2022). Toisen lähteen mukaan matalan kuormituksen käyttöolosuhteissa sähkömekaaninen venttiilien ohjaustekniologia säästää tavallisessa henkilöautossa jopa 20 prosenttia polttoainetta (Klose 2019).

Kolmas lähde kertoo polttoaineen kulutuksen vähentyvän todellisuudessa kyseisellä teknologialla arviolta 15 prosenttia (Haas ym. 2016, 1061). Neljännen lähteen mukaan uuden eurooppalaisen ajosyklin tulokset ovat vahvistaneet yli 15 prosentin polttoaineenkulutuksen vähenemisen samalla kun saavutetaan EURO IV -päästörajat. (Pischinger, Salber, Van Der Stayy, Baumgarten & Kemper 2000.)

#### 8.4 Päästöt

Koska sähkömekaanisella venttiilien ohjauksella saadaan sylinteriin imutahdin aikana enemmän happea, syntyy työtahdin aikana puhtaampi polttoaine-ilmaseoksen palamisreaktio. Tällöin hyötysuhde kasvaa, jonka seurauksena polttoaineen kulutus laskee. Siitä syystä myös päästöt vähenevät, jolloin seuraavien komponenttien määrä pienenee (Majewski & Jääskeläinen 2024)

- Häkä (CO)
- Hiilivedyt (HC)
- Typen oksidit (NO<sub>x</sub>)
- Hiukkaset eli partikkelit (PM)

Suurin päästöjä vähentävä vaikutus kohdistuu hiilidioksidiin, joka vähenee samassa suhteessa kuin kulutus, koska poltettavan hiilen määrä vähenee. Samalla moottorin kylmäkäynnistyspäästöt pienenevät 60 prosenttia tavalliseen nokka-akselilla toimivaan moottoriin verrattuna. (Elmagdoub ym. 2022). Lisäksi sähkömekaanisella venttiilikoneistolla mahdollistetaan EURO-päästöluokitusten läpäiseminen (Pischinger ym. 2000).

Nokka-akselittomat moottorit sekä eteenkin sähkömekaanisella venttiilien ohjauksen tekniikat tarjoavat teoriassa merkittäviä etuja polttomoottorien suorituskyvylle, taloudellisuudelle ja ympäristöystävällisyydelle, mikä tekee niistä hyvin houkuttelevia vaihtoehtoja tulevaisuuden autoilussa.

## 9 Sähkömekaanisen ohjauksen aiheuttamat rajoitukset

Sähkömekaaninen venttiilien ohjaus sisältää useita haasteita, jotka pitää ratkaista ennen kuin se voidaan ottaa luotettavasti käyttöön sarjatuotantomootoreissa. Ongelmaksi muodostuvat moottorin korkeat pyörimisnopeudet, jotka asettavat tiukkoja vaatimuksia sähköisen ohjauksen toiminnalle.

Venttiilien ohjaamiseen tarvitaan suuri virtamäärä, jonka takia järjestelmä vaatii jatkuvaa virransyöttöä toimiakseen luotettavasti. Tämä edellyttää tehokasta sähköjärjestelmää, minkä vuoksi nykyinen 12 V jännitteellä toimiva järjestelmä ei välttämättä riitä. Alalla on keskusteltu 48 V jännitteellä toimivaan virtapiiriin siirtymisestä, mikä on tullut ajankohtaiseksi sähköautojen kehityksen myötä. Tämä johtuu siitä, että suuremmalla jännitteellä mahdollistetaan pienempi virtamäärä, mikä on toiminnalle edullista. Tällainen muutos mahdollistaisi paremman tehonhallinnan ja luotettavuuden vaativissa sovelluksissa, kuten sähkömekaanisessa venttiilien ohjauksessa. (Tracy 2017; Schweber 2021)

Tehokkaan jäähtymisen järjestäminen on olennainen osa ratkaisua, samoin venttiilin iskun pehmentäminen sen ääriarvoissa. Lisäksi erityisen tarkasti on otettava huomioon paloturvallisuus mahdollisten oikosulkujen ja ylikuumenemisen varalta. Ongelmia aiheuttaa myös moottorin käynnistysvaihe, erityisesti tilanteissa, joissa akun varaus on heikko.

Koska sähköiset järjestelmät ovat alttiita ohjelmistovirheille, on tärkeää varmistaa moottorin toimintojen luotettavuus ja turvallisuus myös häiriötilanteissa. Tämä edellyttää tehokkaita häiriönhallintavarmistusjärjestelmiä, jotta moottori ei vaurioidu mahdollisten virhetilanteiden seurauksena.

Useat autovalmistajat ovat pyrkineet kehittämään erilaisia muuttuvia venttiilien ohjausratkaisuja, mutta täydellisyyteen ei vielä ole päästy pitkien kehitystoimienkaan jälkeen. Tuotekehitystyö vie ensinnäkin merkittävästi aikaa ja resursseja. Lisäksi uuden teknisen ratkaisun on oltava kustannustehokas, helposti huollettavissa ja sovellettavissa suureen tuotantomäärään.

Sähkömekaanisen venttiilien ohjauksen tuomia hyötyjä verrataan kehitystyöhön kokonaisuudessaan, erityisesti energiankulutuksen ja hyötysuhteen näkökulmasta. Asiantuntijat ovat miettineet sähkömekaanisella venttiilien ohjauksella saavutettavan hyödyn olevan niin pieni, ettei ideaa edes kannattaisi kehittää pidemmälle. Lisäksi järjestelmien kehittäminen ja ylläpito ovat operaatioina kalliita, ja niiden integroiminen olemassa oleviin moottoriratkaisuihin voi olla teknisesti haastavaa.



## 10 Pohdinta

Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli perehtyä sähkömekaanisesti toteutetun venttiilien ohjauksen tuomiin hyötyihin ja haasteisiin verrattuna perinteisiin venttiilikoneistoihin. Työssä onnistuttiin keräämään laajasti tietoa monista eri lähteistä ja ne pitivät sisällään niin sähköisesti kuin fyysisesti saatavilla aineistoja. Katsauksen tarkoituksena oli koota yhteen olemassa olevaa tietoa ja herättää lukijan ajatukset mahdollisesti alaa muuttavasta teknologiasta.

Aiheeseen johdatettiin aluksi esittelemällä venttiilikoneiston perustoiminta moottorissa ja sen merkitys moottorin suorituskyvylle. Tämän jälkeen siirryttiin tarkastelemaan erilaisia venttiilien ohjaustekniikoita, erityisesti muuttuvan venttiilien ohjauksen eri muotoja ja säätöjärjestelmiä, jotka mahdollistavat venttiilien ajoituksen, aukioloajan sekä avautumiskorkeuden vaihtelun ajon aikana. Näiden lisäksi avattiin täysin muuttuvan venttiilien ohjauksen tuomia mahdollisuuksia, mukaan lukien ratkaisut nokka-akselilla ja ilman.

Keskittyen sähkömekaaniseen venttiilin ohjaukseen, tarkastelussa korostettiin teknistä toteutusta ja sen tarjoamia etuja moottoritekniikassa. Erityisesti huomio kiinnittyi vääntömomentin, tehon, kulutuksen ja päästöjen hallintaan, jotka ovat keskeisiä tekijöitä moottorin suorituskyvyn ja ympäristöystävällisyyden kannalta. Työssä pohdittiin myös, miten sähkömekaaninen venttiilien ohjaus voisi tulevaisuudessa mullistaa moottoritekniikkaa ja millaisia etuja se tarjoaa verrattuna perinteisiin ratkaisuihin.

Sähkömekaanista venttiilien ohjausta on pidetty autoalan Graalin maljana ja insinöörien unelmana pitkään. Vaikka kyseistä teknologiaa on kehitetty yli 20 vuotta, sen varsinaista läpimurtoa ei ole vielä saavutettu. Kuten monien muiden mullistavien keksintöjen kohdalla, kehitystyö vaatii useita vaiheita ennen lopullista onnistumista, mikä tuo mukanaan merkittäviä kustannuksia.

Tarkastelujen perusteella kyseisen teknologian integrointi vanhoihin polttomoottoreihin on suurimmalta osin sivuutettu. Autokannan siirtyminen kohti sähkökäyttöisiä ja muita vaihtoehtoisia voimanlähteitä vie aikaa, mutta moottorinohjausyksikön uudelleen ohjelmoinnilla ja korvaavan sylinterikannen avulla voitaisiin mahdollisesti pidentää vanhojen polttomoottorien käyttöikä, parantaa niiden suorituskykyä ja vähentää aiheutuvia päästöjä.

Lisäksi sähkömekaanisen venttiilien ohjauksen yhteensopivuutta vaihtoehtoisten polttoaineiden, kuten korkeaseosetanolin kanssa voisi jatkossa tarkastella, sekä voisiko tätä teknologiaa hyödyntää dieselmootoreissa, laivateollisuudessa tai muissa käyttökohteissa.

Jatkotutkimuksissa voisi myös perehtyä tarkemmin sähkömekaanisen venttiilin tekniseen toimintaan, mahdollisesti rakentaa aktuaattorin prototyyppi ja testata sen toimivuutta. Lisäksi sähkömekaanisen venttiilin ohjausyksiköön perehtyminen ohjelmistotasolla voisi tarjota arvokasta tietoa.

Kehitystyön jatkuessa tulevaisuudessa uudet innovaatiot voivat tuoda ratkaisuja työssä esitettyihin haasteisiin. Esimerkiksi pietsosähkötekniikka voisi tarjota lisätutkimuksien valossa vastauksen sähköiseen venttiilien ohjaukseen.

Aiheesta on yleisellä tasolla saatavilla runsaasti tietoa, mutta tuoretta dataa on hankala löytää ja tieteelliset julkaisut olivat usein 20 vuotta vanhoja. Samoin patenttien määrästä ei ollut uudempaa dataa helposti saatavilla.

Uuden teknologian kehittäminen on kallista, mutta tietyissä sovelluksissa se voi olla välttämätöntä paremman suorituskyvyn ja ympäristöystävällisemmän ratkaisun saavuttamiseksi. Ulkoisella venttiilien ohjausjärjestelmällä voitaisiin kuitenkin mahdollisesti saavuttaa yksinkertaisempi, luotettavampi, tehokkaampi, ympäristöystävällisempi ja kevyempi moottoriratkaisu.

Koska uusien polttomoottoriautojen myynti uhataan lopettaa Euroopan unionissa vuonna 2035, sähkömekaanisen venttiilien ohjauksen odotetaan mahdollisesti tarjoavan menestykseen vaadittavat eväät polttomoottorien käytön viimeisille vuosille.

## Lähteet

Ahonen, H. 1998. TM-autosanasto. Helsinki: Yhtyneet Kuvalehdet Oy.

Denger, D. & Mischker, K. 2005. The Electro-Hydraulic Valvetrain System EHVS - System and Potential, SAE Technical Papers [Preprint]. Saatavilla: <https://doi.org/10.4271/2005-01-0774>.

Design Group 2018. Digital Valves Open Up New Possibilities For Engines - Electrical Engineering News and Products. Saatavilla: <https://www.eeworldonline.com/digital-valves-open-up-new-possibilities-for-engines/> Viitattu 8.5.2024.

ECC 2024. ECC - Fully variable valve train. Saatavilla: [http://eccing.de/ecc/index.php?option=com\\_content&task=view&id=53&Itemid=76&lang=english](http://eccing.de/ecc/index.php?option=com_content&task=view&id=53&Itemid=76&lang=english) Viitattu: 10.7.2024.

Eerola, O.E. 1976. Polttomoottorit 1. 3th edn. Jyväskylä: K.J. Gummerus Oy.

Eerola, O.E. 1978. Polttomoottorit 2. 2nd edn. Jyväskylä: K.J. Gummerus Oy.

Elmagdoub, A.W.M. Möller, A. Carlson, U. Brace, C. Akehurst, S. Turner, J. & Zhang, N. 2022. Freevalve: Control and Optimization of Fully Variable Valvetrain-Enabled Combustion Strategies for High Performance Engines, SAE Technical Papers [Preprint]. Saatavilla: <https://doi.org/10.4271/2022-01-1066>.

SCRABSF1 no date. F1 Engines \_ Valve technology. Saatavilla: <http://scarbsf1.com/valves.html> Viitattu: 24.6.2024.

Grant, A. 2021. Tech deep dive: Hyundai Continuously Variable Valve Duration | Automotive Powertrain Technology International. Saatavilla: <https://www.automotivepowertraintechnologyinternational.com/features/tech-deep-dive-hyundai-continuously-variable-valve-duration.html> Viitattu: 30.6.2024.

Haapaniemi, H. 1978. Autoteknillinen taskukirja. Tampere: Suomen Autoteknillinen Liitto ry.

Haas, M. Gebauer, K. Josef, O. Bonse, R. & Krüger, G. 2016. Internal Combustion Engine Handbook. 2nd edn. Edited by R. Basshuysen and F. Schäfer. Warrendale, Pennsylvania USA.

Hannibal, W. Flierl, R. Stiegler, L. & Meyer, R. 2004. Variable Valve Actuation. SP-1829. Society of Automotive Engineers.

Hannibal, W. no date. Palivaventi. Saatavilla: <http://palivaventi.com/english/pali-Categories.html> Viitattu: 27.6.2024.

Hara, S. Suga, S. Watanabe, S. & Nakamura, M. 2009. Variable Valve Actuation Systems for Environmentally Friendly Engines, Hitachi Review.

Freevalve 2024. Improved starting ability with bio-fuel capability | Freevalve. Saatavilla: <https://www.freevalve.com/bio-fuel-capability/> Viitattu: 17.7.2024.

Jiang, L. Liu, L. Peng, X. & Xu, Z. 2020. Design and Analysis of a Fully Variable Valve Actuation System, Energies 2020, Vol. 13, Page 6391, 13(23). Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/EN13236391>.

Kershaw, J.F. 2023. SAE International's Dictionary for Automotive Engineers. Warrendale, Pennsylvania, USA: Sherry Dickinson Nigam. Saatavilla: <https://doi.org/10.4271/R-523>.

Kimbrough, B. 2013. Camshaft 101: The History and Substance Of Camshafts. Saatavilla: <https://www.chevyhardcore.com/tech-stories/camshaft-101-the-history-and-substance-of-camshafts/> Viitattu: 23.6.2024.

Klose, R. 2019. Innovative valve train saves 20% fuel, Emap. Saatavilla: <https://www.empa.ch/web/s604/flexwork> Viitattu: 23.6.2024.

Lu, J. & Chang, S. 2019. Precise motion control of an electromagnetic valve actuator with adaptive robust compensation of combustion force, Journal of the Franklin Institute, 356(4), pp. 1750–1770. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/J.JFRANKLIN.2018.12.010>.

Majewski, A. & Jääskeläinen, H. 2024. Engine Emission Control, DieselNet. Saatavilla: [https://dieselnet.com/tech/engine\\_emission-control.php](https://dieselnet.com/tech/engine_emission-control.php) Viitattu: 5.7.2024.

Nivala, A. & Perälä, V. 1993. Muuttuva venttiilinoitus ottomoottorissa. Helsinki Otaniemi.

Pischinger, M. Salber, W. Van Der Stay, F. Baumgarten, H. & Kemper, H. 2000. Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation, SAE Technical Papers [Preprint]. Saatavilla: <https://doi.org/10.4271/2000-01-1223>.

Pneumatic Valve Actuation no date. Saatavilla: [https://www.formula1-dictionary.net/pneumatic\\_valve\\_actuation.html](https://www.formula1-dictionary.net/pneumatic_valve_actuation.html) Viitattu: 24.6.2024.

Qiu, Y. Perreault, D.J. Keim, T.A. & Kassakin, J.G. 2010. Optimal Cam Design and System Control for an Electromechanical Engine Valve Drive.

Robert Bosch GmbH 2011. Automotive Handbook. 8th edn. Wiley.

Ruotsalainen, M. 2017. Polttomoottoreiden Venttiilikoneistot.

Schweber, B. 2021. Electronic engines valves: an idea whose time has come ...and gone?, Part 3: The electronic camless approach - Electrical Engineering News and Products. Saatavilla: <https://www.eeworldonline.com/electronic-engines-valves-an-idea-whose-time-has-come-and-gone-part-3-the-electronic-camless-approach-faq/> Viitattu: 8.5.2024.

Sebasti, J.S., Prof, Z. & Wensing, M. 2010. Schaeffler SYMPOSIUM 2010. Erlangen-Nürnberg.

Solenoid Valves 101 2013. NEW BRITAIN, CT.

Tracy, D. 2017. Everything You Need To Know About The Upcoming 48-Volt Electrical Revolution In Cars, Jalopnik [Preprint]. Saatavilla: <https://jalopnik.com/everything-you-need-to-know-about-the-upcoming-48-volt-1790364465> Viitattu: 18.7.2024.

Turner, C.W. Babbitt, G.R. Balton C.S, Raimao, M.A. & Giordano, D.D. 2004. Variable Valve Actuation. SP-1829. Society of Automotive Engineers.

IdeaConnection no date. Variable Duration Camshaft or Helical Camshaft. Saatavilla: <https://www.ideaconnection.com/patents/15413-Variable-Duration-Camshaft-or-Helical-Camshaft.html> Viitattu: 7.7.2024.