

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Тема 1. Методология моделирования современных электромеханических систем

1. Анализ и синтез систем управления

Проектирование – это процесс изобретения таких компонентов системы, которые позволяли бы ей выполнять поставленные задачи.

Процесс проектирования подразумевает планирование деятельности по созданию некоторого изделия или системы.

Цель проектирования – определение конфигурации системы, требований, которым она должна удовлетворять, и задании основных параметров, удовлетворяющих предъявляемым к системе требованиям.

После формулирования задачи и требований (точная формулировка того, каким должна быть система и что оно должно делать) к проектируемой системе, основными этапами, следующими один за другим, проектирования являются:

1. анализ – основное внимание уделяется анализу существующих разработок и построению моделей физических систем. Целью анализа является более глубокое понимание процессов, происходящих в системе и анализ путей ее проектирования.
2. синтез – создание действующей физической системы на основе проведенного анализа.

В настоящее время для разработки различных систем управления широко применяется компьютерное моделирование. Так, например, самолет Боинг-777, оснащенный самой современной бортовой аппаратурой, был почти полностью спроектирован с помощью компьютерных технологий. Высокоточное компьютерное моделирование крайне важно для проверки результатов синтеза систем. Тот же Боинг-777 около 2400 раз был испытан с помощью компьютерного

моделирования, прежде чем был построен первый самолет этой серии, что значительно сократило затраты финансовых вложений и времени на разработку.

На этапе анализа проектировщик выполняет следующие основные задачи:

- определение необходимости создания данной системы;
- проработка возможного решения проблемы (методы достижения цели),
- оценка альтернативных вариантов решения проблемы,
- оценка фактора риска, непредвиденных последствий, неопределенности
- оценка факторов стоимость – эргономичность,

На этапе синтеза системы управления проектировщик выполняет следующие основные задачи:

- определение цели и назначения системы. Например, целью является поддержание заданного значения скорости вращения электродвигателя,
- указать параметры, которые подлежат управлению (в данном случае это скорость вращения),
- уточнить требования к точности системы (в нашем случае точности, с которой необходимо поддерживать скорость вращения электродвигателя). Точность определяет выбор датчика, подлежащая управлению,
- создание конфигурации системы, которая обладала бы желаемым качеством (включает в себя объект управления, датчик, исполнительное устройство и управляющее устройство (регулятор), соединенные определенным образом (рис. 1)),

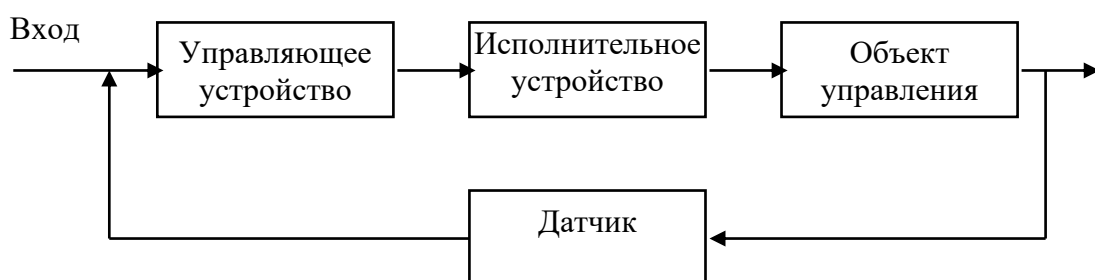


Рис. 1. Система управления с обратной связью

- выбор всех элементов системы: исполнительного устройства – основного звена в системе (выбор определяется типом объекта управления), датчика, регулятора и определение ключевых параметров, подлежащих настройке;
- настройка (оптимизация) параметров системы, анализ качества.

При анализе и синтезе систем управления используются, как правило, математические модели физических объектов.

При анализе основное внимание уделяется построению моделей физических систем. Целью анализа является более глубокое понимание процессов, происходящих в этих системах, указание путей совершенствования этих моделей.

Процесс анализа интерпретируют также с расчленение (разбиением) системы на отдельные элементы или составляющие, с целью построения на основе известных элементов новой системы.

Синтез системы – непосредственно проектирование физической системы, соединение ее элементов в единое целое.

Проектирование включает в себя следующие этапы:

- идентификация основных параметров и элементов (анализ),
- формирование конфигурации системы (синтез),
- оценка полученной системы по тем требованиям, которые к ней предъявляются (тестирование, испытания).

Эти три этапа проектирования образуют замкнутый цикл.

2. Постановка цели моделирования

При создании или модернизации любой системы встает задача определения ее эффективности. Если может быть создано несколько вариантов системы, то из них требуется выбрать наилучший. Решение этих задач и является основной целью моделирования.

Для определения эффективности системы используется понятие технико-экономической эффективности (Е), которые учитывает затраты и характеристики

системы, такие как производительность, надежность, стоимость, масса, габаритные размеры и т.д.

Однокритериальная оценка.

Если оценку эффективности системы проводить по одному показателю качества $y_{\text{опт}}$,

$$E = y_{\text{опт}},$$

а по остальным характеристикам накладывают ограничения на их допустимые изменения

$$y_{i \min} \leq y_i \leq y_{i \max}, i = \overline{1, n},$$

то такая оценка называется однокритериальной.

Недостатком такой оценки является то, что можно получить несколько вариантов системы с одинаковыми значениями $y_{\text{опт}}$ при существенно различных других показателях качества y_i . В этом случае нельзя с уверенностью определить более рациональный вариант.

Многокритериальная оценка.

Одной из распространенных форм многокритериальной оценки эффективности является нормированный аддитивный критерий:

$$E = \sum_{i=1}^n b_i \gamma(y_i),$$

где b_i – весовые коэффициенты, $\sum_{i=1}^n b_i = 1, b_i \geq 0$

$\gamma(y_i)$ – функции, которые исключают размерность y_i и обеспечивают условие $\gamma(y_i) \in [0, 1]$. В частном случае, когда $0 \leq y_i \leq y_{i \max}$, эта

функция рассчитывается по формуле $\gamma(y_i) = \frac{y_i}{y_{i \max}}$.

При такой оценке возникает проблема определения весовых коэффициентов.

3. Виды моделирования электромеханических систем

Моделирование бывает трех видов:

1. **Натурное моделирование.** Исследование параметров системы и моделирование его работы производится в реальных условиях эксплуатации непосредственно на испытательном образце системы.

Достоинство: высокая достоверность полученных результатов, потому что эксперимент проводится на реальном физическом объекте в реальных условиях эксплуатации.

Недостатки: высокая стоимость исследований, а в некоторых случаях, полная невозможность их проведения (система находится в стадии разработки, а не усовершенствования, или неизвестны условия эксплуатации).

2. **Физическое моделирование.** Исследование параметров системы и моделирование его работы производится в лабораторных условиях на испытательном образце системы или ее части.

Достоинство: относительно высокая достоверность полученных результатов, потому что эксперимент проводится на реальном физическом объекте, но в лабораторных условиях эксплуатации.

Недостатки: относительно высокая стоимость исследований, а в некоторых случаях, полная невозможность их проведения (система находится в стадии разработки, а не усовершенствования, или неизвестны условия эксплуатации).

3. **Математическое моделирование.** Исследование параметров системы и моделирование его работы производится на математических моделях физических объектов. Их динамика в общем случае описывается дифференциальными уравнениями.

3. Математические модели электромеханических систем

3.1 Основы построения математических моделей. Преобразование Лапласа.

Математическая модель представляет собой формализованное описание системы с помощью абстрактного языка, в частности, с помощью математических соотношений, отражающих процесс функционирования системы. Для составления модели можно использовать любые математические средства – алгебраические, дифференциальное, интегральное исчисление, теория множеств, теория алгоритмов и т.д. В настоящее время мощным средством для моделирования и исследования систем управления с обратной связью является Simulink, а также другие системы моделирования.

При разработке электромеханических систем управления чаще всего используют математические модели физических объектов. Математическая модель позволит изучить свойства разрабатываемой мехатронной (электромеханической) системы. При построении математических моделей необходимо установить все взаимосвязи между переменными, которые характеризуют поведение системы.

Поскольку все реальные системы по своей природе являются динамическими, то для их описания используются дифференциальные уравнения. Для решения системы полученных уравнений используется преобразование Лапласа.

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Метод преобразования Лапласа позволяет заменить достаточно сложное решение дифференциальных уравнений относительно простым решением алгебраических уравнений.

Переменную s в преобразовании Лапласа можно рассматривать как оператор дифференцирования:

$$s \rightarrow \frac{d}{dt}$$

Аналогично можно ввести оператор интегрирования

$$\frac{1}{s} \rightarrow \int_0^t dt$$

Определение реакции системы на входное воздействие подразумевает следующие действия:

1. Получение дифференциальных уравнений, описывающих поведение исследуемой системы.
2. Преобразование по Лапласу этих дифференциальных уравнений.
3. Решение полученных алгебраических уравнений.

3.2 Дифференциальные уравнения физических систем

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику физической системы, получаются на основании фундаментальных физических законов. Этот метод в равной степени применим к механическим, электрическим, гидравлическим и термодинамическим системам.

Для описания механических систем используются законы Ньютона, а для электрических – законы Кирхгофа. Например, математическая модель простой модели автомобильного амортизатора (система пружина-масса с демпфированием за счет вязкого трения о стенки) эквивалентна математической модели электрической R, L, C цепи.

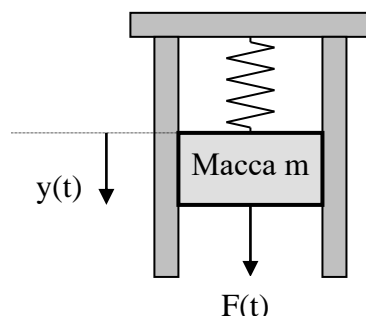


Рис. 2 – Система пружина-масса с демпфированием

Переходные характеристики передемпфированной системы масса-пружина соответствуют аperiodическому характеру функции $i=f(t)$ в электрической R, L, C цепи (корни характеристического уравнения вещественные), а переходные характеристики недодемпфированной системы масса-пружина соответствуют периодическому характеру функции $i=f(t)$ в электрической R, L, C цепи (корни характеристического уравнения комплексные).

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = F(t),$$

где k – коэффициент упругости пружины,

b – коэффициент трения.

Решение дифференциального уравнения, описывающего динамический процесс недодемпфированной системы пружина-масса с демпфированием, описывается выражением

$$y(t) = Ke^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)$$

Типичный характер движения такой недодемпфированной системы представлен на рис. 3.

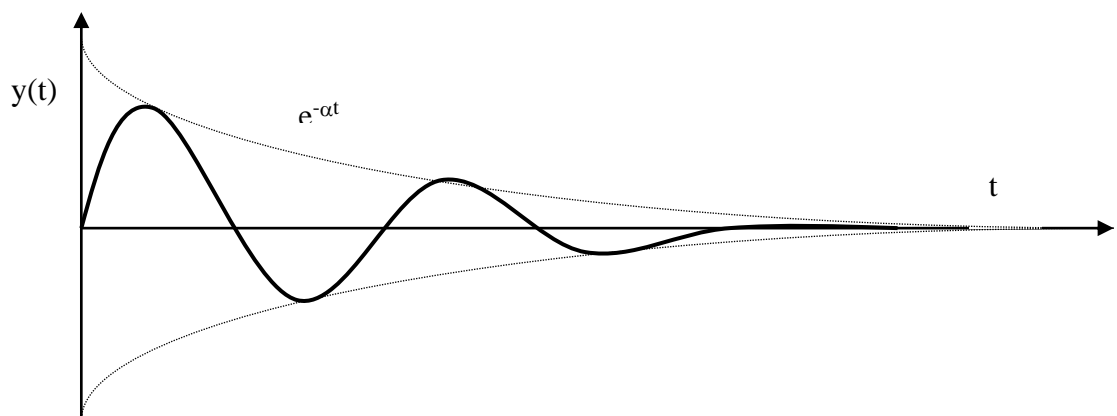


Рис. 3 - Характер движения недодемпфированной системы.

Примеры дифференциальных уравнений к некоторым электрическим и механическим системам:

Индуктивные накопители:

Индуктивность -
$$U = L \frac{di}{dt}$$

Пружина сжатия -
$$V = \frac{1}{k} \frac{dF}{dt},$$

где V – скорость,

$1/k$ – обратный коэффициент упругости пружины,

F – сила.

Пружина кручения -
$$\omega = \frac{1}{k} \frac{dM}{dt},$$

где ω – угловая скорость,

M – момент.

Емкостные накопители:

Емкость -
$$i = C \frac{dU}{dt}$$

Масса с линейным перемещением -
$$F = m \frac{dV}{dt}$$

Вращающаяся масса -
$$M = J \frac{d\omega}{dt},$$

где J – момент инерции

Рассеиватели мощности:



Электрическое сопротивление -
$$i = \frac{U}{R}$$

Амортизатор линейного действия -
$$F = bV,$$

где b – коэффициент трения.

Вращающийся амортизатор -
$$M = b\omega$$

Некоторые важные преобразования Лапласа

$f(t)$	$F(s)$
Ступенчатая функция 	$1 / s$
Импульсная функция 	1
e^{-at}	$1 / s+a$
$\sin(\omega t)$	$\omega / s^2+\omega^2$
$\cos(\omega t)$	$s / s^2+\omega^2$
$f''(t)=d^2 f(t) / dt^2$	$s^2F(s) - sf(0-) - d f(0-) / dt$
$e^{-at} \sin(\omega t)$	$\omega / (s^2+a^2)+\omega^2$
$e^{-at} \cos(\omega t)$	$s+a / (s^2+a^2)+\omega^2$
t^n	$n! / s^{n+1}$

3.3 Линеаризация физических систем.

Подавляющее большинство физических систем является линейными только в некотором диапазоне изменения переменных. При неограниченном возрастании этих переменных все системы становятся нелинейными. Так, например, механическая система масса-пружина, рассмотренная выше, является линейной и описывается уравнением 1.1 только при условии малых отклонений $y(t)$. Если же $y(t)$ будет постоянно увеличиваться, то может произойти необратимое растяжение пружины или ее разрыв.

Необходимым условием линейности системы является соответствующая связь между возмущением $x(t)$ и реакцией $y(t)$ системы.

Линейная система удовлетворяет принципам суперпозиции и гомогенности (масштабирования).

Принцип суперпозиции. Если к системе, находящейся в покое, приложить возмущение $x_1(t)$, то на выходе появится реакция $y_1(t)$. Если при тех же условиях приложить возмущение $x_2(t)$, то на выходе появится реакция $y_2(t)$. Согласно принципу суперпозиции возмущение $x_1(t)+ x_2(t)$ вызовет на выходе реакцию $y_1(t)+ y_2(t)$.

Принцип гомогенности. При умножении возмущения $x(t)$ на константу k , на выходе реакция изменится во столько же раз, т.е. будет равна $ky(t)$.

Не все механические и электрические элементы в достаточно широком диапазоне изменения переменных можно считать линейными. Нелинейные элементы можно линеаризировать при условии малых отклонений сигналов от стационарных значений. Такой прием обычно используется для получения линейных моделей транзистора и электронных схем.

Рассмотрим общий случай, пусть у некоторого элемента связь между возмущением $x(t)$ и реакцией на него $y(t)$ определяется уравнением:

$$y(t) = f(x(t))$$

Обозначим координату рабочей точки через x_0 . Касательная в этой точке может служить хорошей аппроксимацией исходной кривой в случае малого приращения $\Delta x = x - x_0$. Значение производной в рабочей точке x_0 характеризует тангенс угла наклона касательной:

$$\frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{dx}{dy} = \operatorname{tg} \frac{x - x_0}{y - y_0}$$

Пример. Рассмотрим колебания маятника.

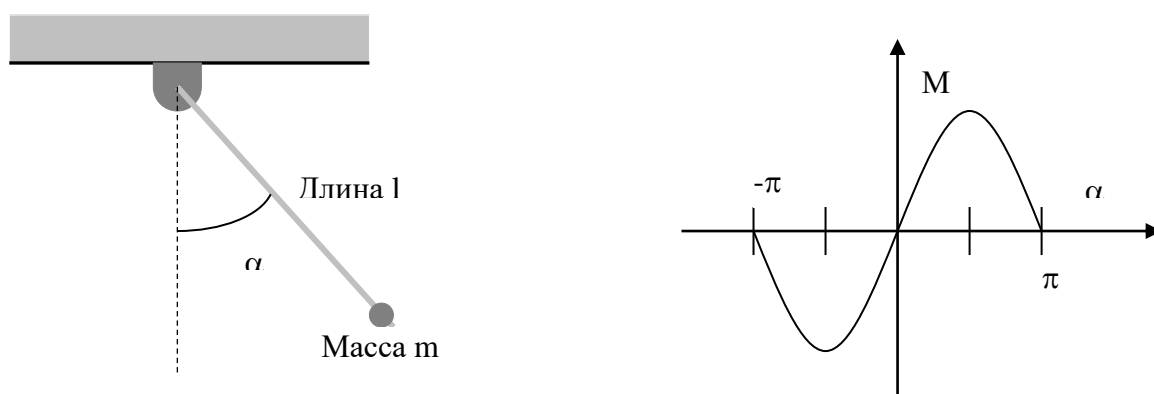


Рис. 4 – Колебания маятника

Момент, действующий на массу, равен:

$$M = mgl \sin \alpha,$$

где g – ускорение свободного падения.

Вычисление первой производной в точке равновесия $\alpha_0=0$ ($M_0=0$) дает линейную аппроксимацию этого уравнения:

$$M - M_0 \approx mgl \frac{\partial \sin \alpha}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=\alpha_0} (\alpha - \alpha_0)$$

$$M = mgl(\cos 0)(\alpha - 0) = mgl\alpha$$

Подобная аппроксимация является достаточно приемлемой в диапазоне $-\pi/6 \leq \alpha \leq \pi/6$, при этом колебания линейной модели отличаются от действительных колебаний маятника не более чем на 2 %.

3.4 Алгоритм исследования динамики системы

1. Структурный анализ системы.

1.1 Определить структуру систему и связь ее компонентов (блоков, звеньев, элементов).

1.2 Записать дифференциальные уравнения, которые описывают поведение блоков модели.

1.3 Решить уравнения, используя преобразование Лапласа (получить передаточные функции блоков).

1.4 При необходимости упростить структурную схему.

2. Параметрический анализ системы.

2.1 Решить уравнения относительно желаемых выходных переменных (провести имитационное моделирование, например, при помощи компьютерного моделирования).

2.2 Провести анализ решения.

2.3 При необходимости изменить коэффициенты или структуру системы и провести повторный анализ и синтез системы.

Этот алгоритм в равной степени применим к механическим, электрическим, гидравлическим и термодинамическим системам. Кстати, электродвигатели применяются только в системах, которые не критичны к быстродействию и развиваемой мощности. Более значительной нагрузочной способностью обладают гидравлические исполнительные устройства.

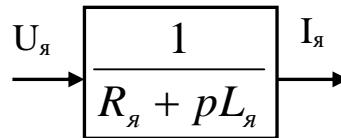
3.5 Структурный анализ системы.

3.5.1. Правила составление структурной схемы системы.

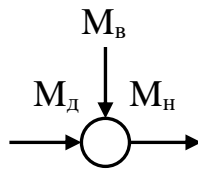
При моделировании систем управления важнейшим этапом является составления структурной (алгоритмической) схемы. Такие схемы получают обычно из функциональной схемы, только вместо функционального назначения отдельных элементов, записывают передаточные функции этих элементов. Сущность структурного анализа заключается в адекватном графическом отображении динамических свойств системы.

Структурные схемы состоят из четырех групп элементов:

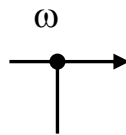
1. Динамический блок направленного действия, характеризуемый определенной передаточной функцией.



2. Сумматор (узел сравнения), в которых происходит сложение или вычитание двух сигналов



3. Точка ветвления, в которых путь сигнала разветвляется на несколько путей



4. Связей, указывающих направление распространения сигнала



Структурная схема отражает только динамические свойства системы. Одной и той же структурной схеме может соответствовать несколько физически различных систем с различными функциональными элементами, различным принципом их действия и различной конструкции.

Основное достоинство структурных схем состоит в том, что громоздкое формальное решение совместных уравнений, описывающих динамические процессы в исследуемой системе, заменяется наглядными преобразованиями, имеющими геометрическую интерпретацию.

3.5.2. Правила описания системы с несколькими входами

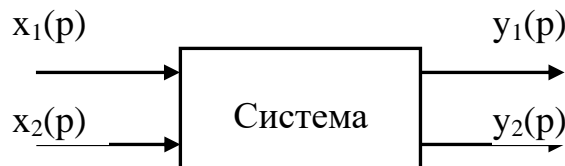


Рис. 5 – Система с двумя входами и выходами

Для описания системы с несколькими управляемыми переменными используется структурная схема с перекрестными связями.

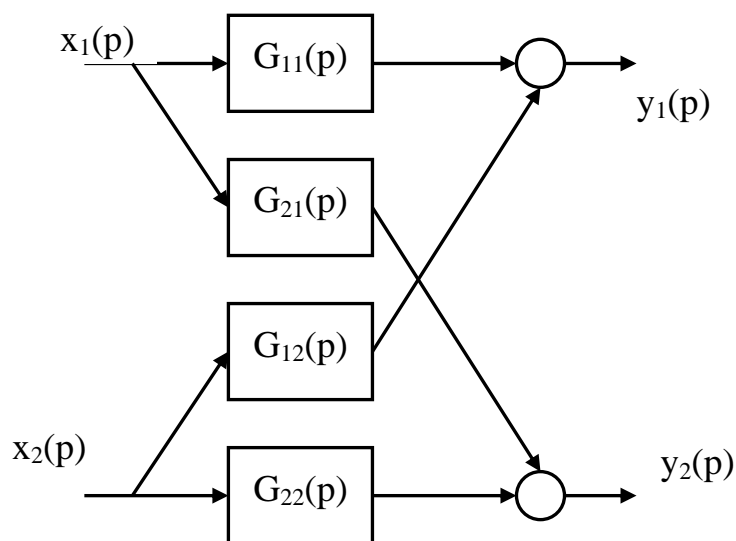


Рис. 6 – Структурная схема системы с двумя входами и выходами с перекрестными связями

С помощью передаточных функций можно записать связывающие их уравнения:

$$Y_1(p) = G_{11}(p)X_1(p) + G_{12}(p)X_2(p)$$

$$Y_2(p) = G_{21}(p)X_1(p) + G_{22}(p)X_2(p),$$

где $G_{ij}(p)$ – передаточная функция от j -го входа к i -му выходу

В общем случае, при наличии j входов и i выходов, связывающие их уравнения можно записать в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} Y_1(p) \\ Y_2(p) \\ \dots \\ Y_i(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(p) & G_{12}(p) & \dots & G_{1j}(p) \\ G_{21}(p) & G_{22}(p) & \dots & G_{2j}(p) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ G_{i1}(p) & G_{i2}(p) & \dots & G_{ij}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(p) \\ X_2(p) \\ \dots \\ X_j(p) \end{bmatrix}$$

или в компактном виде

$$Y = GX,$$

где X и Y – матрицы-столбцы, элементами которых являются j входных и i выходных переменных,

G – матричная передаточная функция размерности $i \times j$.

Подобное матричное представление имеет особую ценность при анализе многосвязных (многомерных) систем управления.

3.5.3 Правила преобразования структурных схем.

Пользуясь определенными правилами, структурную схему сложной системы можно упростить.

Поскольку передаточные функции описывают линейные системы, то им присуще свойство коммутативности, т.е. два последовательно соединенных блока можно заменить одним с передаточной функцией, равной произведению передаточных функций последовательных блоков.

$$X_3(p) = G_2(p)X_2(p) = G_1(p)G_2(p)X_1(p)$$

Методы преобразования структурных схем основаны на рассмотрении алгебраических соотношений между отдельными переменными. Например, структурную схему с отрицательной (положительной) обратной связью (рис. 6) можно преобразовать следующим образом.

$$X_1(p) = X(p) \mp Y(p)H(p)$$

Поскольку

$$Y(p) = G(p)X_2(p),$$

то

$$Y(p) = G(p)(X(p) \mp Y(p)H(p)).$$

Группируя члены при $Y(p)$, получим

$$Y(p)(1 \pm G(p)H(p)) = G(p)X(p)$$

Отсюда получим передаточную функцию, связывающую выход со входом:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{G(p)}{1 \pm G(p)H(p)}$$

Эта передаточная функция свойственна большинству реальных систем управления и называется передаточной функцией замкнутой системы.

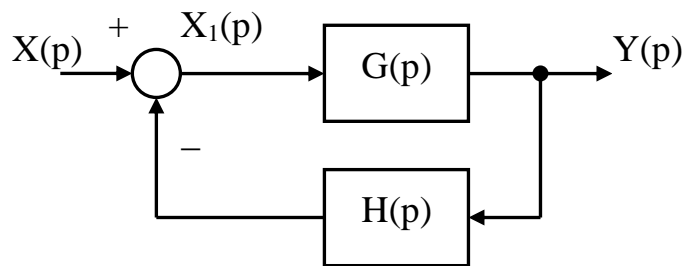
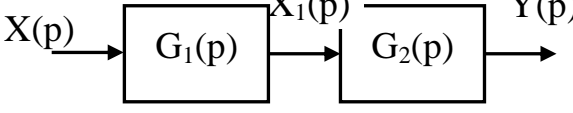
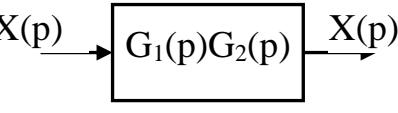
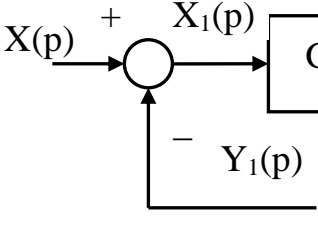
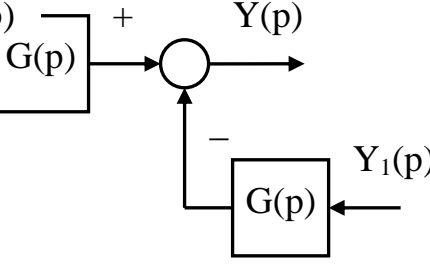
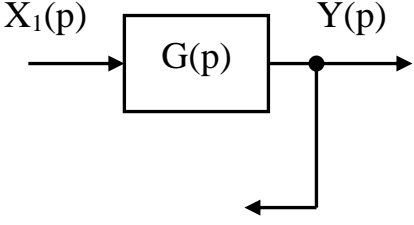
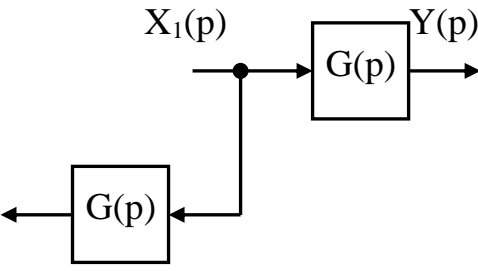
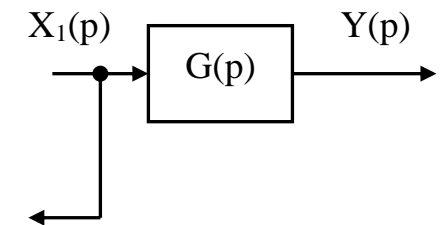
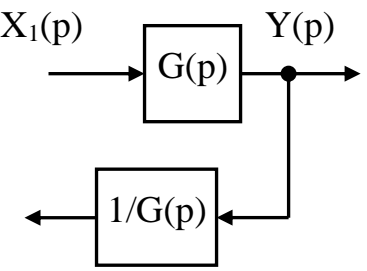
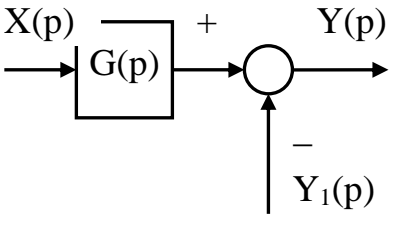
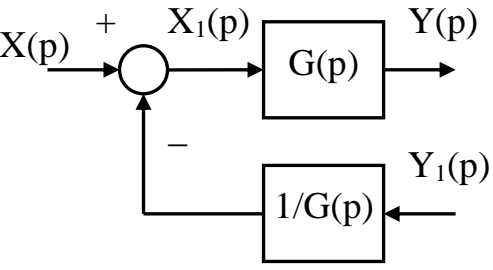
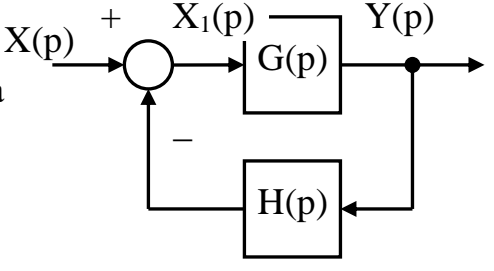
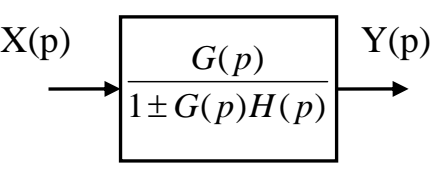


Рис. 6 - Структурная схема системы с отрицательной обратной связью

В таблице показаны некоторые распространенные преобразования структурных схем

Таблица – Правила преобразования структурных схем

Преобразование	Исходная диаграмма	Эквивалентная диаграмма
Последовательное соединение блоков		
Перенос сумматора через блок с передаточной функцией		
Перенос узла через блок с передаточной функцией по ходу движения сигнала		
Перенос узла через блок с передаточной функцией против движения сигнала		
Перенос сумматора через блок против движения сигнала		
Исключение контура с обратной связью		

3.6 Передаточные функции линейных систем

3.4.1 Передаточная функция существует только для линейных стационарных систем (систем с постоянными параметрами).

Передаточной функцией линейной стационарной системы называется отношение изображения $Y(p)$ выходной величины $y(t)$ к изображению $X(p)$ входной величины $x(t)$ при нулевых начальных условиях

$$K(p) = \frac{Y(p)}{X(p)},$$

где p – комплексная переменная.

3.4.2 В качестве простейшего примера рассмотрим составление уравнения динамики и передаточной функции RC – цепи.

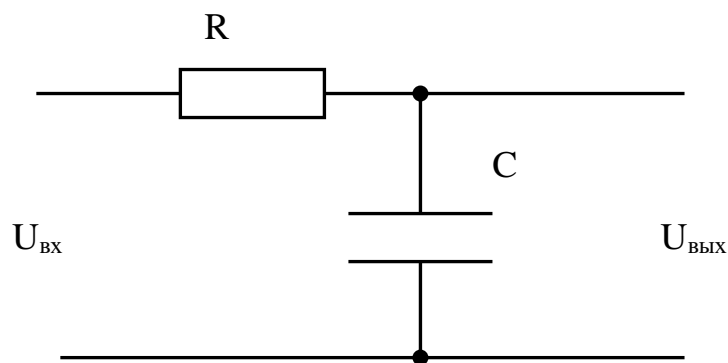


Рис. 5 – RC-цепь

По второму закону Кирхгофа имеем

$$U_{\text{вх}}(t) = U_R(t) + U_C(t)$$

$$U_R(t) = i(t)R$$

$$U_C(t) = \int_0^t i(t)dt$$

Из уравнения (3.4.3) определим ток в цепи

$$i(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt}$$

Выразив входное напряжение через выходное $U_{\text{вых}} = U_c$, получим уравнение динамики RC-цепи

$$RC \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c = U_{\text{ex}}(t),$$

где $RC = \tau$ – постоянная времени цепи

Если в уравнения динамики все производные положить равными нулю, то они вырождаются в уравнения статики. В данном случае уравнение статики принимает вид

$$U_c = U_{\text{ex}}(t)$$

Для определения передаточной функции RC-цепи необходимо полученное дифференциальное уравнение записать в операторной форме (в изображения по Лапласу)

$$\tau p Y(p) + Y(p) = X(p)$$

$$(\tau p + 1)Y(p) = X(p)$$

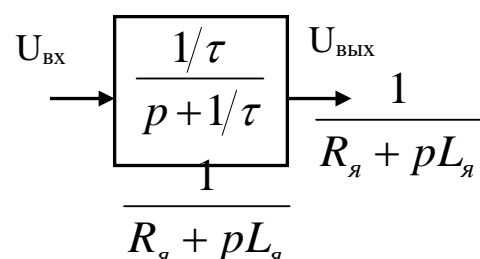
Передаточная функция RC-цепи

$$K(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{\tau p + 1} = \frac{1/\tau}{p + 1/\tau}$$

Точно такое же выражение можно было бы получить сразу, если рассматривать эту цепь как обычный делитель напряжения с коэффициентом передачи по напряжению равным

$$K(p) = \frac{Z_{\text{вых}}(p)}{Z_{\text{ex}}(p)} = \frac{1/Cp}{R + 1/Cp} = \frac{1/\tau}{p + 1/\tau}$$

Очевидно, что структурная схема RC-четырёхполюсника будет представлять собой один динамический блок



Эта схема соответствует формуле

$$U_{\text{вых}}(p) = U_{\text{вх}}(p) \frac{1/\tau}{p + 1/\tau},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи.

Любая передаточная функция полностью отображает только внутренние динамические свойства системы, характеризуемые коэффициентами усиления и постоянными времени при нулевых начальных условиях, и не зависят от вида входного воздействия. С другой стороны, передаточная функция не несет никакой информации о внутренних переменных и характере их изменения.

Следовательно, реакция цепи описывается уравнением, согласно обратному преобразованию Лапласа.

$$k(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{1}{RC}t},$$

а в установившемся режиме $\lim_{t \rightarrow \infty} k(t) = 0$.

3.4.3. Передаточная функция двигателя постоянного тока.

ДПТ находят широкое применение в различных системах управления благодаря таким качествам, как высокий вращательный момент, возможность регулирования скорости в широком диапазоне, компактность, хорошие нагрузочные характеристики. Эквивалентная электрическая схема ДПТ и представлена на рис. 6.

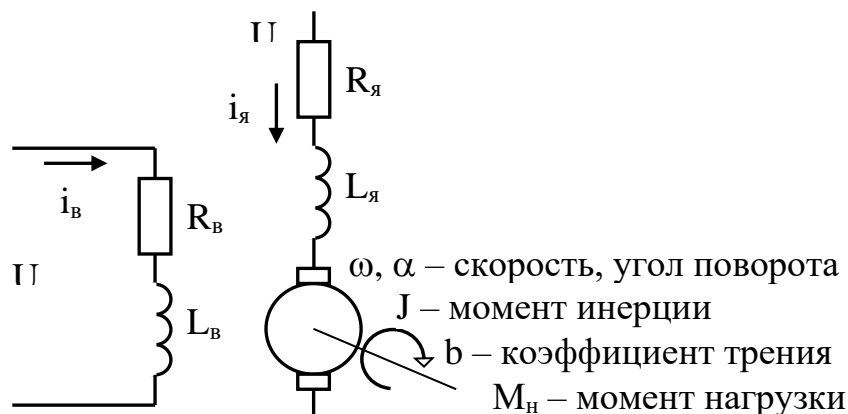


Рис. 6 - Эквивалентная электрическая схема ДПТ.

Входное напряжение может быть подано на обмотку возбуждения (ОВ) или на якорь. Если отсутствует насыщение, то магнитный поток Φ в воздушном зазоре пропорционален току возбуждения $i_{\text{в}}$.

$$\Phi(t) = k_{\text{в}} i_{\text{в}}(t),$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент пропорциональности.

Момент M , развиваемый двигателем, линейно зависит от магнитного потока Φ и тока якоря $i_{\text{я}}$.

$$M(t) = k_1 \Phi(t) i_{\text{я}}(t) = k_1 k_{\text{в}} i_{\text{в}}(t) i_{\text{я}}(t),$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности.

Чтобы двигатель можно было считать линейным элементом, один из токов ($i_{\text{я}}(t)$ или $i_{\text{в}}(t)$) должен быть постоянным, а другой следует рассматривать в качестве входного тока. Т.е. управление можно осуществлять либо по цепи ОВ при постоянном токе якоря, либо наоборот.

3.4.3.1. Сначала рассмотрим двигатель, управляемый по цепи обмотки возбуждения, т.е. ток якоря $i_{\text{я}} = I_{\text{я}} = \text{const}$. Тогда преобразуя по Лапласу, получим:

$$M_{\text{д}}(p) = (k_1 k_{\text{в}} I_{\text{я}}) I_{\text{в}}(p) = K_{\text{д}} I_{\text{в}}(p),$$

где $K_{\text{д}}$ – постоянная электродвигателя постоянного тока.

Ток возбуждения связан с напряжением $U_{\text{в}}$ на обмотке возбуждения соотношением

$$I_{\text{в}} = \frac{V_{\text{в}}(p)}{R_{\text{в}} + pL_{\text{в}}},$$

где $R_{\text{в}}$ и $L_{\text{в}}$ – активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря.

Развиваемый двигателем момент прикладывается к нагрузке. В ряде случаев надо еще учитывать возмущающий момент $M_{\text{в}}$ от внешних сил (например, сила порыва ветра, действующую на антенну), которым часто можно пренебречь $M_{\text{в}} = 0$.

$$M_{\text{д}}(p) = M_{\text{н}}(p) + M_{\text{в}}(p)$$

Момент нагрузки в случае ее вращательного движения записывается как

$$M_H(p) = Jp^2\alpha(p) + bp\alpha(p)$$

Передаточная функция двигателя из полученных уравнений будет равна

$$\frac{\alpha(p)}{U_B(p)} = \frac{K_D}{p(R_B + pL_B)(b + pJ)}$$

Модель электродвигателя, управляемого по цепи возбуждения, в виде структурной схемы приведена на рис. 7.

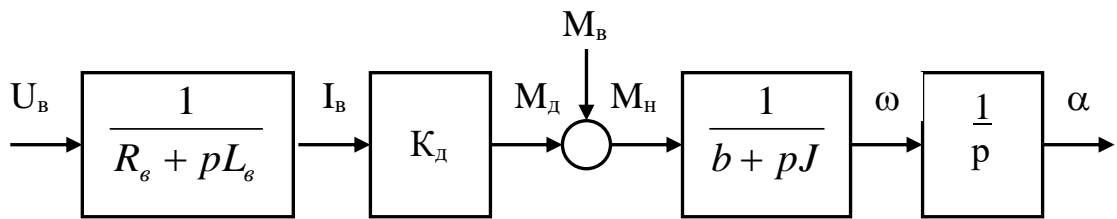


Рис. 7 – Структурная схема двигателя, управляемого по цепи возбуждения

Постоянная времени обмотки возбуждения $\tau_B = L_B/R_B$ меньше постоянного времени двигателя $\tau_d = J/b$, поэтому часто τ_B пренебрегают. Для двигателей мощностью до 200 Вт (≈ 0.25 л.с.) $\tau_B = L_B/R_B \approx 1$ мс.

3.4.3.2. В двигателе, управляемом по цепи якоря, входным (управляющим) воздействием является ток якоря i_a . Поле, создаваемое статором, может быть образовано постоянным током в обмотке возбуждения или постоянными магнитами.

Момент, Тогда преобразуя по Лапласу, получим:

$$M_d(p) = (k_1 k_B I_B) I_a(p) = K_D I_a(p),$$

где K_D - постоянная электродвигателя постоянного тока.

Ток в цепи якоря связан с напряжением, приложенным к якорю, соотношением

$$I_{я} = \frac{V_{я}(p) - e(p)}{R_{я} + pL_{я}},$$

где $e(p) = K_e \omega$ - противоЭДС, пропорциональная скорости вращения.

Развиваемый двигателем момент прикладывается к нагрузке. В ряде случаев надо учитывать возмущающий момент $M_{в}$ от внешних сил, которым часто можно пренебречь $M_{в}=0$.

$$M_{\partial}(p) = M_{н}(p) + M_{е}(p)$$

Момент нагрузки в случае ее вращательного движения записывается как

$$M_{н}(p) = Jp^2\alpha(p) + bp\alpha(p)$$

Связь между переменными, характеризующими динамику двигателя, управляемого по цепи якоря схематически показана на рис. 8.

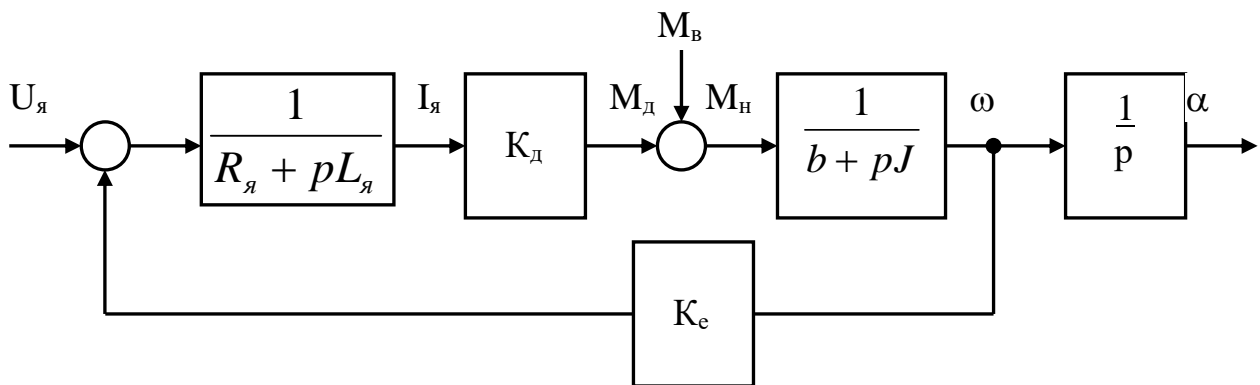


Рис. 8 – Структурная схема двигателя, управляемого по цепи возбуждения

По структурной схеме получим и по полученным уравнениям получим передаточную функцию двигателя, управляемого по цепи якоря.

$$\frac{\alpha_{\partial}(p)}{U_{\partial}(p)} = \frac{K_{\partial}}{p[(R_{\partial} + pL_{\partial})(b + pJ) + K_e K_{\partial}]}$$

Для многих двигателей постоянной времени якоря $\tau_{я} = L_{я}/R_{я}$ можно пренебречь. Для двигателей мощностью до 200 Вт (≈ 0.25 л.с.) $\tau_{в} = L_{в}/R_{в} \approx 100$ мс.

Типичные параметры электродвигателя постоянного тока с выходной мощностью до 200 Вт.

Параметры двигателя, обозначение	Примерные значения параметров, размерность
Постоянная двигателя, K_d	$50 \cdot 10^{-3}$ Нм/А

Момент инерции ротора, J	$10^{-3} \text{ Нмс}^2/\text{рад}$
--------------------------	------------------------------------

Преимущество передаточной функции заключается в том, что она позволяет математически описать причинно-следственную связь между переменными в наглядной схематичной форме. Знание передаточной функции элементов позволяет проводить моделирование динамических систем, составлять ее структурную схему. Вторым важнейшим этапом моделирования – это определение численных характеристик передаточной функции всех элементов. Например, в автомобиле мощность, развиваемая двигателем, передается колесам через коробку передач и дифференциал (структурный анализ). В зависимости от скорости автомобиля и дорожных условий автоматическая коробка передач должна оптимально выбирать передаточное отношение (параметрический анализ).

1 АНАЛІЗ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ TOYOTA PRIUS

1.1 Гібридний транспортний засіб Toyota Prius

Автомобіль Toyota Prius, найпоширеніший з легкових автомобілів, що нині випускаються з гібридною силовою установкою, забезпечує зниження середньої витрати палива до 50 %. По всьому світу реалізовано понад 7 млн. автомобілів Toyota Prius різних модифікацій (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики Toyota Prius різних поколінь

Основні характеристики		Модель				
		Prius-1	Prius-1,5	Prius-2	Prius-3	PHV
Початок продажів, р.		1997	2000	2003	2009	2012
Батарея	Тип	Ni-MH	Ni-MH	Ni-MH	Ni-MH	Li-ion
	Ємність, А·год	6	6,5	6,5	6,5	15
	Маса, кг	57	50	45	45	80
	Напруга, В	288	273,6	201,6	201,6	345,6
	Енергоємність, кВт·год	1,73	1,78	1,31	1,31	4,4
Потужність електродвигуна, кВт		30	33	50	60	60
Бензиновий двигун	Потужність, кВт	43	52,8	57	73	73
	Макс. оберти, об/хв.	4000	4500	5000	5200	5200
	Об'єм, см ³	1498	1498	1498	1798	1798
Потужність гібридна, кВт		58	73	82	100	100
Максимальна швидкість / на електроприводі, км/год		160 / 40	160 / 40	180 / 60	180 / 70	180/100
Розгін до 100 км/год, с		15,5	13,4	10,9	10,4	10,8
Маса, кг		1240	1220	1260	1380	1525
Викид CO ₂ , г/км		108	108	104	90	49
Середня витрата палива, л/100км		5,1	4,9	4,3	3,9	2,2

Тяговий електричний двигун гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive здатний працювати як генератор, для перетворення кінетичної енергії гальмування автомобіля в електричну енергію для заряду високовольтної акумуляторної батареї. При цьому електроенергія на борту автомобіля може

генеруватися у трьох випадках:

- за рахунок роботи бензинового двигуна;
- за рахунок механічної енергії гальмування автомобіля в системі рекуперативного гальмування;
- за рахунок підключення до стандартної електромережі, так звана система Plug-In Hybrid Vehicle (PHV) – гібридний транспортний засіб з можливістю заряду акумуляторних батарей від стаціонарної електричної мережі у модифікаціях Prius-PHV (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Заряд акумуляторних батарей автомобіля Toyota Prius

Гібридна силова установка здатна забезпечити роботу двигуна внутрішнього згоряння в режимах його найбільшої ефективності. Роботою всієї гібридної силової установки керує бортовий комп'ютер, який мінімізує витрату палива та шкідливих викидів ДВЗ.

Завдяки гібридній силовій установці автомобіль Toyota Prius здатний працювати в трьох режимах:

- «EV-Drive» – режим «тільки електрика»;
- «Power» – спортивний режим;
- «Eco» – екологічний режим при якому забезпечується оптимальна витрата палива та мінімізація викидів.

Погоджують роботу на всіх режимах планетарний механізм, перетворювач напруги та система керування. Приладова панель автомобіля обладнана сенсорним дисплеєм, який відображає режим роботи двигуна, залишок заряду акумуляторної батареї та інші важливі параметри.

Силова установка Hybrid Synergy Drive складається з економічного ДВЗ, що працює по циклу Аткинсона, тягового електродвигуна, стартер-генератора, джерела енергії, планетарного механізму, який розподіляє і поєднує потоки потужності від ДВЗ, електричного двигуна і генератора та передає рушійну силу через понижувальну передачу на приводний вал. Система керування, залежно від умов руху, автоматично визначає підключення кожного з тягових двигунів та ступінь участі кожного з них. Обидва двигуна (або кожний окремо) обертають через редуктор передні ведучі колеса (рисунок 1.2).

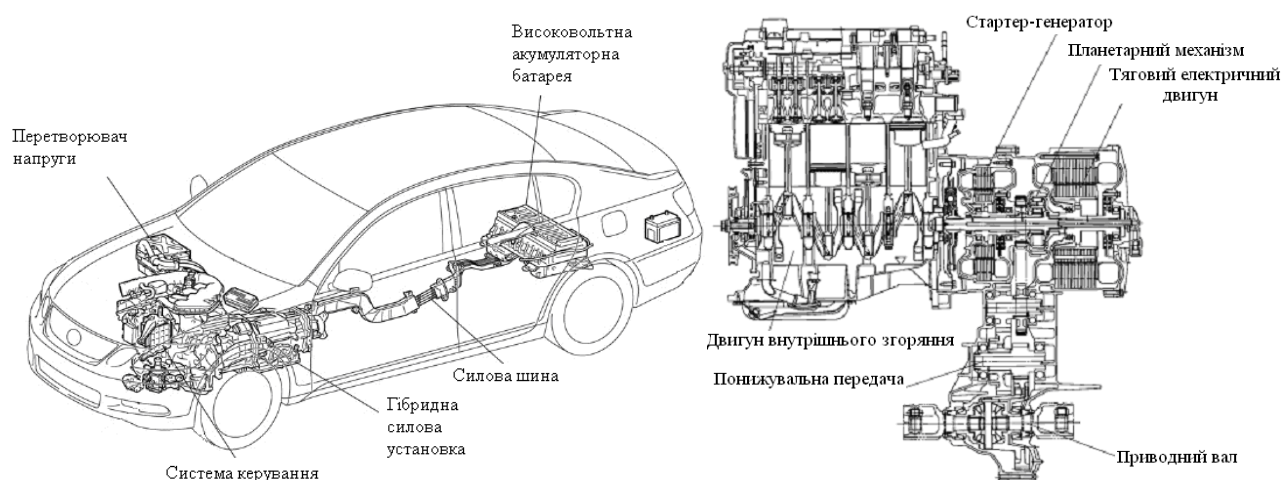


Рисунок 1.2 – Схема гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive

Встановлений за двигуном внутрішнього згоряння планетарний механізм розділяє потік потужності на дві гілки: одна йде до редуктора головної передачі, інша – до електричного генератора змінного струму, який заряджає через перетворювач напруги високовольтну акумуляторну батарею. Крім цього, від генератора при необхідності поступає енергія (через перетворювач напруги) в тяговий електричний двигун, який використовується в режимах, при яких ДВЗ має низький ККД. В таких режимах ДВЗ відключається, і автомобіль здійснює рух тільки на електротязі. В решті випадків ДВЗ налаштується на економічний режим роботи, при якому механічна енергія перетворюється генератором в електричну енергію для живлення тягового електричного двигуна і заряду акумуляторної батареї. Також досягнута висока ефективність регенерації енергії

під час скидання оборотів ДВЗ і гальмування. Крім цього, гібридна силова установка стала більш ефективною за рахунок поліпшеного енергетичного контролю і вдосконаленій системі рекуперації.

Для збільшення ефективності система Hybrid Synergy Drive отримала коло високої напруги (до 650 В), що дозволяє зменшити масово-габаритні характеристики електричної трансмісії. Коло високої напруги є новою технологією, яка вперше була упроваджено в гібридному автомобілі Toyota Prius. Підвищення напруги живлення дозволило застосовувати електричний двигун великої потужності, і при цьому майже удвічі зменшити струм, що означає зменшення теплових втрат в 4 рази. Це вносить додатковий внесок в підвищення ефективності гібридної системи

Підвищує ефективність у Toyota Prius PHV літій-іонні акумуляторні батареї, які встановлені замість нікель-метал-гідридних, при цьому їх загальна енергоємність зростає з 1,31 кВт·год до 4,4 кВт·год (дивись таблицю 1.1). Застосування літій-іонної акумуляторної батареї дозволяє збільшити дальність поїздки в режимі «тільки електрика» тязі з 2 км до 26 км, при цьому швидкість на електричній тязі збільшується до 100 км/год. Завдяки застосуванню літій-іонної акумуляторної батареї, за даними виробника, витрата палива зменшилась до 2,2 л/100 км, одночасно знизилась показники вмісту CO₂ у відпрацьованих газах до 49 г/км.

При розрядці високовольтної акумуляторної батареї, система керування автоматично регулює перемикання в стандартний режим, при якому обсяг вихлопу збільшується до 85 г/км, а витрата палива в такому випадку, буде складати вже 3.7 л/100 км. Повністю заправлений і заряджений, Toyota Prius PHV може проїхати більш ніж 1200 км. А час повної зарядки літій-іонних акумуляторних батарей становить всього 1,5 год.

Для нової моделі Toyota Prius PHV в якості опції можна придбати сонячну батарею SunRoof, яка додає силовій установці потужності до 250 Вт. Фотоелементи SunRoof виконані у вигляді звичайного люка і виконують його функції. Енергія від фотоелектричних елементів передається в автономну систему

вентилювання, яка не вимагає підтримки від двигуна внутрішнього згоряння або акумуляторних батарей. Тонкі фотоелементи мають товщину 0,6 мм, що ніяк не впливає на аеродинаміку автомобіля.

Автомобіль Toyota Prius має обтічну форму, тому коефіцієнт аеродинамічного опору становить лише 0,25, що знижує витрату палива, особливо на високих швидкостях або при сильному зустрічному вітрі.

1.1 Силова установка Hybrid Synergy Drive

Дослідження гібридної силової установки проведено на прикладі гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius. Як силову установку Toyota Prius використовує два джерела механічної енергії – бензиновий двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) потужністю 57 кВт і електродвигун, що має живлення від високовольтних акумуляторних батарей, здатний розвивати максимальну потужність 50 кВт. Об'єднання цих двох незалежних джерел дає підвищення паливної економічності і зменшення шкідливих викидів в порівнянні з традиційними автомобілями. Це досягається наступними енергозберігаючими властивостями гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive:

- зменшення втрат енергії досягається за рахунок вимикання ДВЗ, що працює в марному режимі;
- використання кінетичної енергії при сповільненні і гальмуванні автомобіля, яка зазвичай втрачається, перетворюючись у теплову. Генератор і електродвигун в цей час перетворюють механічну енергію в електричну, яка потім використовується;
- система електроприводу керується так, що при максимальних швидкостях використовуються найефективніші режими роботи ДВЗ;
- додаткова потужність від електродвигуна використовується в процесі пришвидшення, коли ефективність ДВЗ низька;
- оптимальна ефективність транспортного засобу досягається за рахунок використання електродвигуна, який керує транспортним засобом коли

ефективність ДВЗ низька і виробляє електричну енергію (генераторний режим), коли ефективність ДВЗ висока.

Силова установка Hybrid Synergy Drive – це трансмісія, що складається з електродвигуна, генератора і акумуляторної батареї. Основні складові гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius зображені на рисунку 1.1.

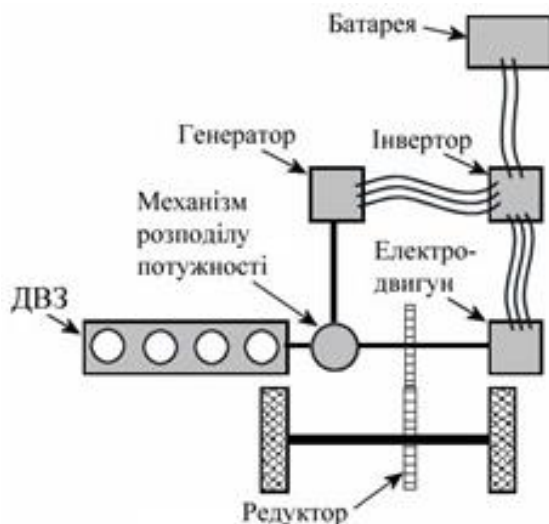


Рисунок 1.1 – Основні складові гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius

На рисунку 1.1 зображено механічну складову, яка називається механізмом автоматичного розподілу потужності (планетарна передача), що розділяє потужність ДВЗ на два потоки. В механічному потоці потужність ДВЗ передається на колеса транспортного засобу безпосередньо через механічну передачу. В електричному потоці, генератор перетворює механічну енергію ДВЗ в електричну. Електрична енергія прямує до електродвигуна чи для зарядки батареї, або те й інше разом. При такому використанні енергії немає необхідності в використанні зовнішнього джерела для зарядки батареї. Механізм розподілу потужності дозволяє ДВЗ функціонувати в околі його найефективніших режимів, незалежно від швидкості транспортного засобу, віддаючи потужність для обертання коліс і одночасно обертаючи ротор генератора. Зовнішній вигляд

гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius показано на рисунку 1.2.

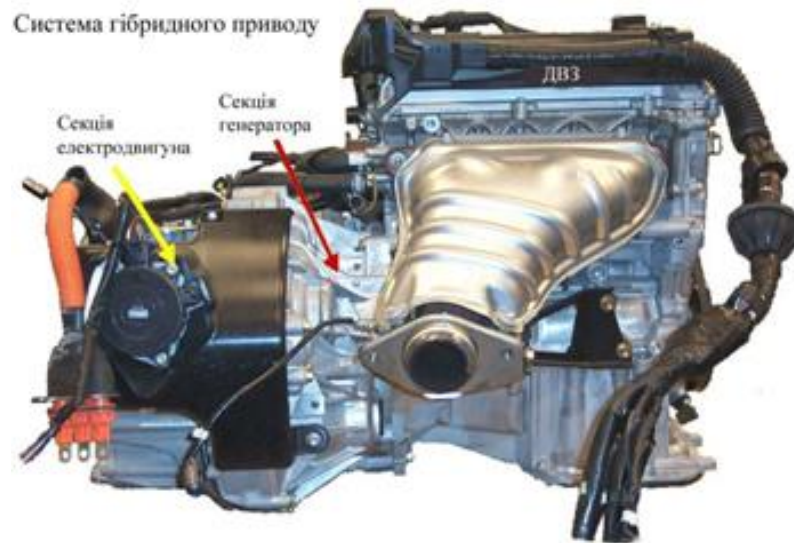


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius

При русі автомобіль Toyota Prius здатний функціонувати в наступних режимах:

- коли ефективність ДВЗ низька, при пуску і малих швидкостях, потужність підводиться від електродвигуна, що використовує енергію збережену в батареї;
- при нормальних умовах руху, ефективність двигуна оптимальна, через механізм розподілу потужності частина енергії йде для обертання коліс, а частина на генератор для заряджання акумуляторної батареї;
- при пришвидшенні, коли необхідна додаткова потужність, використовується електродвигун, що живиться енергією від батареї і генератора;
- при сповільненні і гальмуванні, електродвигун працює як генератор, що дозволяє перетворювати кінетичну енергію автомобіля в електричну енергію, яка зберігається в батареї;
- коли необхідно, генератор підзаряджає батарею для підтримання достатніх запасів енергії;

- час від часу, коли транспортний засіб не рухається і коли ДВЗ працює на неоптимальних режимах навантаження при малій швидкості, ДВЗ автоматично вимикається.

1.2 ДВЗ у складі гібридної силової установки

Одним з основних показників ДВЗ є його ефективна потужність N_e , кВт

$$N_e = \frac{p_e V_h n i_{\text{ц}}}{30\tau}, \quad (1.1)$$

де p_e – середній ефективний тиск в циліндрах, МПа;

V_h – робочий об'єм циліндра, л;

n – частота обертання колінчатого вала, хв^{-1} ;

$i_{\text{ц}}$ – число циліндрів у двигуні;

τ – число ходів поршня за цикл.

Якщо відома ефективна потужність N_e та відповідна до неї частота n вала ДВЗ, то ефективний момент на валу M_e (Нм) дорівнює

$$M_e = \left[\frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \right] \frac{N_e}{n}. \quad (1.2)$$

Ефективний ККД ДВЗ – це відношення роботи, здобутої на валу двигуна, до енергії, що містилась у витраченому паливі

$$\eta_e = \frac{3600 N_e}{H_u G_{\text{нал}}}, \quad (1.3)$$

де H_u – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;

$G_{\text{нал}}$ – годинна витрата палива, кг/год.

Граничні значення ефективного ККД автомобільних ДВЗ не перевищують 0,42 (таблиця 1.2) [3].

Таблиця 1.2 – Ефективні показники ДВЗ

Тип ДВЗ	p_e , МПа	g_e , г/кВт·год	η_e
Бензиновий	від 0,6 до 0,95	від 250 до 330	від 0,2 до 0,35
Дизельний без наддуву	від 0,55 до 0,85	від 210 до 260	від 0,33 до 0,40
Дизельний з наддувом	від 0,7 до 2,2	від 200 до 242	від 0,35 до 0,42

Паливна економічність роботи двигуна оцінюється питомою ефективною витратою палива g_e (г/кВт·год)

$$g_e = 10^3 \frac{G_{нал}}{N_e} . \quad (1.4)$$

Тип ДВЗ NZ-FXE об'ємом 1,5 л, працює на основі циклу Аткинсона, в якому ступінь стиску може змінюватися (рисунок 1.3). Охолодження водяне. Двигун 4-х тактний, 4-х циліндровий, 16 клапанний, з верхнім розміщення 2-х розподільчих валів, ступінь стиску 13:1.

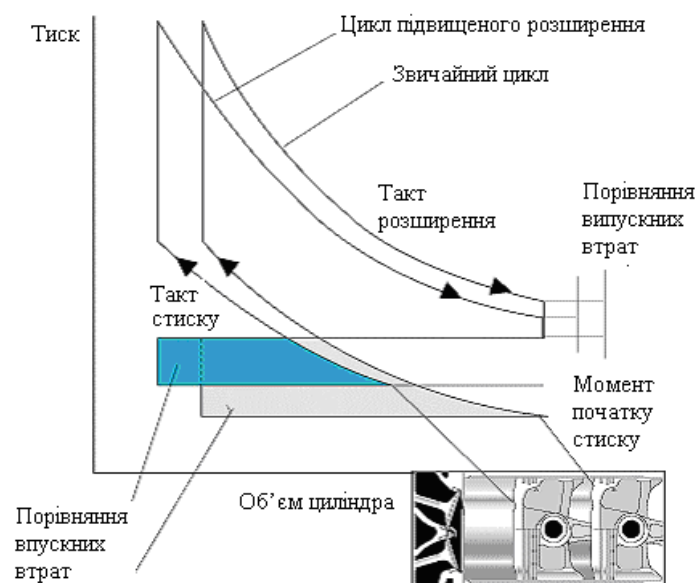


Рисунок 1.3 – Теоретична індикаторна діаграма робочого циклу ДВЗ автомобіля Toyota Prius

Конструкція двигуна забезпечує низький викид шкідливих речовин з випускними газами. Система змінних фаз газорозподілу VVT-i, використовується для точної настройки часу відкриття клапана впускання залежно від умов роботи двигуна, що завжди дозволяє добитися максимальної ефективності. Додатково використана, напівроздільна камера згоряння кривої форми, оберігає від швидкого розповсюдження полум'я по всьому об'єму камери згоряння.

Висока теплова ефективність, спільно із зменшенням як розміру, так і ваги, за рахунок застосування блоку циліндрів з алюмінієвого сплаву, компактного патрубк впускання і т.п. зрештою покращують паливну економічність.

Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ автомобіля Toyota Prius II представлена на рисунку 1.4.

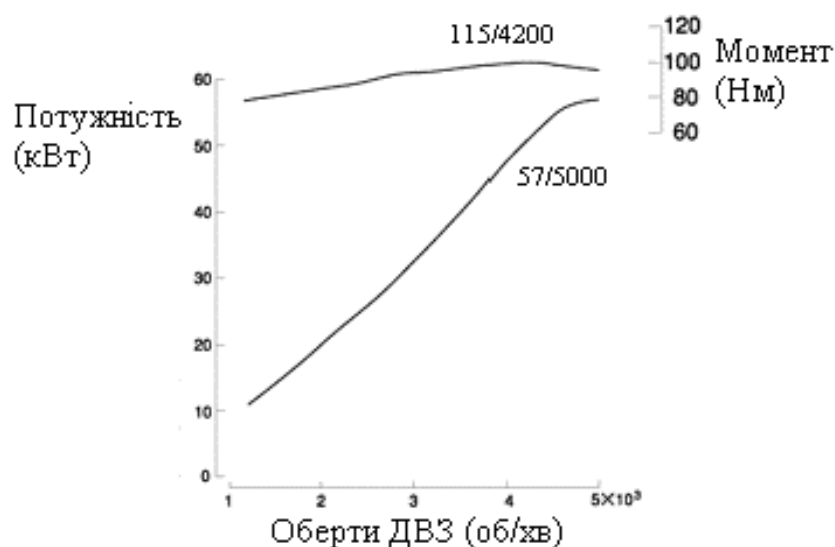


Рисунок 1.4 – Зовнішня швидкісна характеристика ДВЗ Toyota Prius

Система енергетичного контролю. Система енергетичного контролю двигуна внутрішнього згоряння це важливий механізм, що служить для мінімізації витрати палива. Згідно даним про режим руху, ступінь натиснення педалі акселератора і стан зарядженої батареї, система автоматично приймає

рішення: чи варто заглушити двигун внутрішнього згорання і їхати на електротязі, або продовжувати рух з працюючим ДВЗ. При пуску системи автомобіль починає рухатися тільки на електродвигуні, безумовно, якщо акумуляторна батарея заряджена.

При необхідності система енергетичного контролю запускає ДВЗ з допомогою стартер-генератора, і в той же самий час система підраховує загальну кількість енергії, яка необхідна для руху автомобіля. Потім вона визначає оптимально-економічний режим роботи і задає необхідну частоту обертання для двигуна внутрішнього згорання.

В розрахунках необхідної кількості енергії обчислюють необхідну силу тяги на колесах, потужність, що генерується для живлення електричного двигуна, енергетичні потреби бортового електричного та електронного обладнання, а так само необхідний рівень заряду високовольтної акумуляторної батареї. В системі THS II був поліпшений контроль за споживанням і керуванням енергією автомобіля, внаслідок чого поліпшена паливна економічність і екологічна чистота автомобіля.

Система тягового контролю. Сила тяги автомобіля з системою THS II складається з співвідношенням безпосередньої сили тяги від двигуна внутрішнього згорання і потужності тягового електричного двигуна. Чим менше швидкість автомобіля, тим більше задіяна рушійна сила від електричного двигуна. Збільшення максимальної частоти обертання генератора дозволило використовувати максимум ефективної потужності ДВЗ на менших швидкостях, ніж це було можливо в системі попереднього покоління THS.

Оскільки за двигуном внутрішнього згорання немає трансмісії, і використовується прямий привід в поєднанні з силою тяги від електричного двигуна, то це дає можливість постійно контролювати силу тяги на колесах, без ривків забезпечуючи гарні характеристики необхідного руху у всіх діапазонах, від високих швидкостей до низьких і від рівномірного економічного режиму до різкого прискорення, який назвали режимом резервного моменту.

Система рекуперативного гальмування. В установці THS II використана система гальмування контрольованого електронікою (ЕСВ), яка координує діями системи рекуперації і гідравлічного гальма. При цьому в основному використовується рекуперативне гальмування, яке стало можливим завдяки поліпшеним характеристикам батареї, здатної регенерувати більший об'єм енергії широкого діапазону потужності.

ДВЗ в гібридній силовій установці Hybrid Synergy Drive досягає свого кращого споживання палива, працюючи у високих діапазонах обертаючого моменту, тим самим максимізує паливну економічність та екологічну чистоту автомобіля. ДВЗ Toyota Prius працює по циклу Аткинсона, при якому ступінь стиснення і ступінь розширення мають різні значення, що і сприяє економії палива Від контролера кола високої напруги блок керування двигуном внутрішнього згоряння набуває значення потрібних швидкості обертання колінчастого валу і обертаючого моменту. Блок керування двигуном внутрішнього згоряння реалізує данні, що поступили, через керування дросельною заслінкою, цикловою подачею, моментом випередження запалювання і фазами газорозподілу (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Схема структурна системи керування ДВЗ

Про поточні параметри двигуна блок керування повідомляє контролеру кола високої напруги. Одержавши від контролера кола високої напруги запит на відключення двигуна, блок керування зупиняє його. При виникненні несправності блок керування двигуном, по команді контролера кола високої напруги, включає світловий сигналізатор системи самодіагностики.

Для мінімізації витрати палива діє система енергетичного контролю. Згідно даним про режим руху, ступінь натиснення педалі акселератора і стан зарядженості високовольтної акумуляторної батареї, система автоматично приймає рішення: чи варто заглушити двигун внутрішнього згоряння і їхати на електротязі, або продовжувати рух з працюючим двигуном внутрішнього згоряння.

При пуску системи автомобіль починає рухатися тільки на електричному двигуні, безумовно, якщо акумуляторна батарея заряджена. При необхідності система енергетичного контролю запускає ДВЗ з допомогою стартер-генератора, і в той же самий час система підраховує загальну кількість енергії, яка необхідна для руху автомобіля. Потім вона визначає оптимально-економічний режим роботи і задає необхідну частоту обертання для двигуна внутрішнього згоряння. В розрахунках необхідної кількості енергії обчислюють необхідну силу тяги на колесах, потужність, що генерується для живлення електричного двигуна, енергетичні потреби бортового електричного та електронного обладнання, а так само необхідний рівень заряду високовольтної акумуляторної батареї.

У Hybrid Synergy Drive діє система тягового контролю. Сила тяги автомобіля складається з співвідношенням безпосередньої сили тяги від двигуна внутрішнього згоряння і потужності тягового електричного двигуна. Чим менше швидкість автомобіля, тим більше задіяна рушійна сила від електричного двигуна. Збільшення максимальної частоти обертання генератора дозволило використовувати максимум ефективної потужності ДВЗ на менших швидкостях, ніж це було можливо в системі попереднього покоління.

Оскільки за двигуном внутрішнього згоряння немає трансмісії, і використовується прямий привід в поєднанні з силою тяги від електричного

двигуна, то це дає можливість постійно контролювати силу тяги на колесах, без ривків забезпечуючи гарні характеристики необхідного руху у всіх діапазонах, від високих швидкостей до низьких і від рівномірного економічного режиму до різкого прискорення, який називають режимом резервного моменту.

1.3 Електричні машини у складі гібридної силової установки

Вибір тягового електричного двигуна для його використання у гібридних транспортних засобах залежить від схем побудови гібридних силових установок, режимів роботи та вимог, що пред'являються до електропривода. Незважаючи на те, що кожен тяговий електропривод представляє власні вимоги до системи управління і має оптимальні характеристики лише в певному діапазоні частот обертання, до нього пред'являються такі основні вимоги: високий ККД, надійність, невелика маса, можливість регулювання та високий момент у всьому діапазоні частот обертання, придатність для рекуперативного гальмування.

Електрорушійна сила якоря $E_{я}$ виражається залежністю

$$E_{я} = cK_i\Phi\omega, \quad (1.5)$$

де c – конструктивний коефіцієнт;

K_i – коефіцієнт інвертування;

Φ – повний магнітний потік;

ω – кутова швидкість.

Момент M електричного двигуна гібридної установки

$$M = cK_i\Phi I_{я}, \quad (1.6)$$

де $I_{я}$ – струм, який споживає якірна обмотка.

Потужність електричного двигуна отримуємо з формул (1.5) і (1.6)

$$P = E_{я} I_{я} = M \omega. \quad (1.7)$$

По тяговій характеристиці транспортного засобу $F = f(v)$ визначається механічна характеристика $M = f(\omega_{д})$ електричного вентильного двигуна, яка є законом регулювання останнього. Механічна характеристика вентильного двигуна складається з наступних режимів роботи: режим пуску – ділянка АВ, режим постійності потужності – ділянка ВСD із зонами короткочасної (BC) і тривалої (CD) роботи електродвигуна, режим максимальної кутової швидкості ділянка DE (рисунок 1.4).

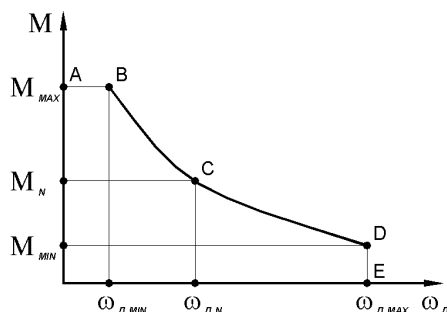


Рисунок 1.4 – Узагальнена механічна характеристика електродвигуна

Координати крапок, що розмежують характерні режими роботи електродвигуна, однозначно визначають кратність максимальної кутової швидкості $K_{\omega} = \omega_{д MAX} / \omega_{д N}$ і кратність максимального пускового моменту $K_M = M_{MAX} / M_N$, які визначають основні параметри тягового електроприводу.

Значення електромагнітного моменту M і кутової швидкості $\omega_{д}$ можна розрахувати по наступних виразах:

$$M = \frac{R_K}{m_K \cdot i_n \cdot \eta_n} F, \quad (1.8)$$

$$\omega_{д} = \frac{i_n}{R_K} v,$$

де R_K – радіус кочення колеса;

F – повна сила тяги автомобіля;

m_K – число ведучих коліс;

i_n – передавальне відношення приводу;

η_n – ККД електроприводу;

v – швидкість руху автомобіля.

Електричний генератор MG1 і тяговий електричний двигун MG2 для Hybrid Synergy Drive розроблені компанією Toyota Motor Corporation та являють собою синхронні машини змінного струму з постійними магнітами, які класифікують як вентильні машини з системою збудження від постійних високоерцитивних магнітів (Nd-Fe-B). В двигуні замість електромеханічного комутатора (колектора) використовується електронний перетворювач напруги – інвертор. Як ключі (вентилі) в інверторі використовуються силові напівпровідникові елементи – транзистори або тиристори.

В електричних машинах MG1 і MG2 застосовується ротор з магнітом, який підвищує гальмівний момент електричної машини. В статорі застосовується сердечник з електротехнічної сталі з низькими активними втратами і обмотка з високовольтною ізоляцією. Це дозволяє електричним машинам MG1 і MG2 розвивати високу потужність і момент при невеликих габаритних розмірах і масі. Вентильна електрична машина MG1 в режимі генератора приводиться в дію двигуном внутрішнього згорання, при цьому виробляється електрична потужність, призначена для зарядки високовольтної акумуляторної батареї і для живлення тягового електричного двигуна MG2, який у складі гібридної трансмісії є тяговим. Електрична машина MG1 в режимі двигуна використовується як стартер для пуску ДВЗ.

Електрична машина MG2 в режимі двигуна застосовується як електропривод та служить джерелом допоміжного моменту для двигуна внутрішнього згорання в гібридному режимі, що сприяє досягненню автомобілем високих динамічних якостей, включаючи плавність руху і динамічні прискорення. В режимі генератора MG2 працює у складі рекуперативного гальмування.

При подачі змінної напруги на трифазну обмотку статора в електричних двигунах виникає обертове магнітне поле. Обертове поле статора взаємодіє з полюсами постійних магнітів ротора і створює обертовий момент (рисунок 1.5).

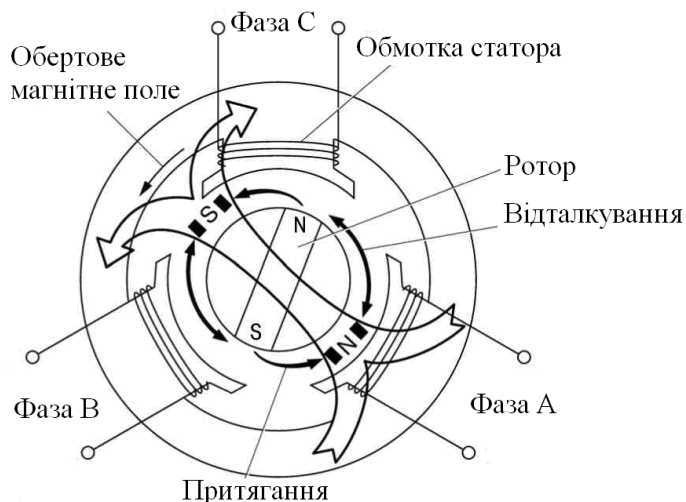


Рисунок 1.5 – Конструкція вентильного двигуна

Обертовий момент практично пропорційний силі струму, а швидкість обертання ротора регулюється частотою змінного струму. Оптимальне керування кутовим зсувом осі магнітів ротора й обертовим магнітним полем статора дозволяє одержати на валу двигуна високий корисний обертовий момент на всіх швидкісних режимах. У режимі генератора обертове магнітне поле ротора наводить струм в обмотці статора.

Система вентильної комутації електричного двигуна (рисунок 1.6) складається з датчика синхронізуючих сигналів, системи керування й перетворювача напруги. Датчик синхронізуючих сигналів, визначаючи порядок і частоту перемикання елементів комутатора, являє собою або датчик положення ротора (при позиційному керуванні) або датчик фази напруги (при фазовому керуванні). Система керування забезпечує формування й посилення синхронізуючих сигналів, а перетворювач напруги реалізує безконтактне перемикання в силових колах двигуна.

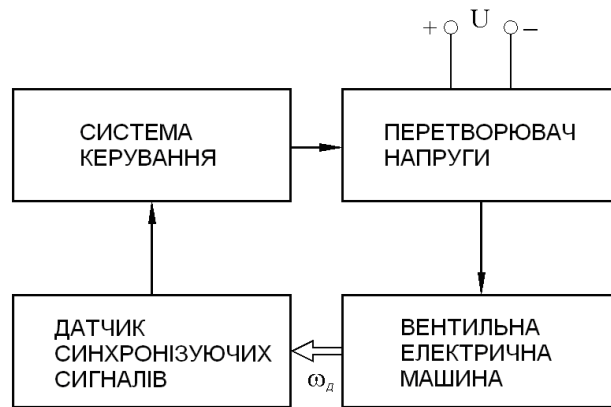


Рисунок 1.6 – Схема структурна електропривода вентильного двигуна

Датчик синхронізуючих сигналів Hybrid Synergy Drive має: котушку збудження А та дві котушки виявлення сигналу S і C (рисунок 1.7).

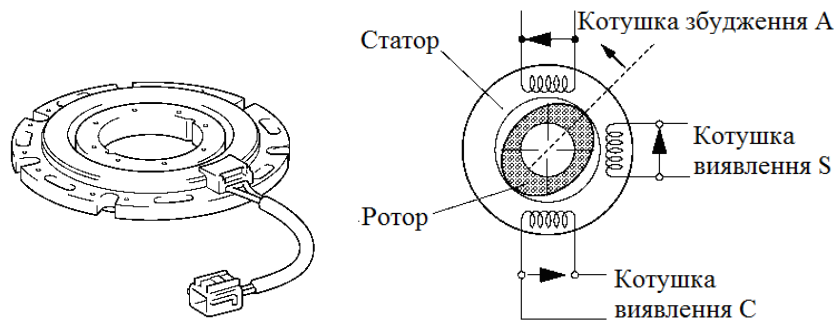


Рисунок 1.7 – Датчик синхронізуючих сигналів та його електрична схема

В котушці збудження А протікає змінний струм з постійною частотою, тому вихідні сигнали котушок S і C також мають постійну частоту, незалежно від частоти обертання ротора. Ротор має овальну форму, і при його обертанні зазор між статором і ротором змінюється. Відповідно, максимальні значення вихідних сигналів котушок S і C змінюються відповідно до положення ротора двигуна.

Блок керування розраховує абсолютне положення ротора електричної машини на підставі різниці між значеннями сигналів котушок S і C. Він визначає напрямок обертання ротора, виходячи з різниці фаз між сигналами котушок S і C, та частоту обертання на підставі зміни положення ротора за певний інтервал часу (рисунок 1.8).

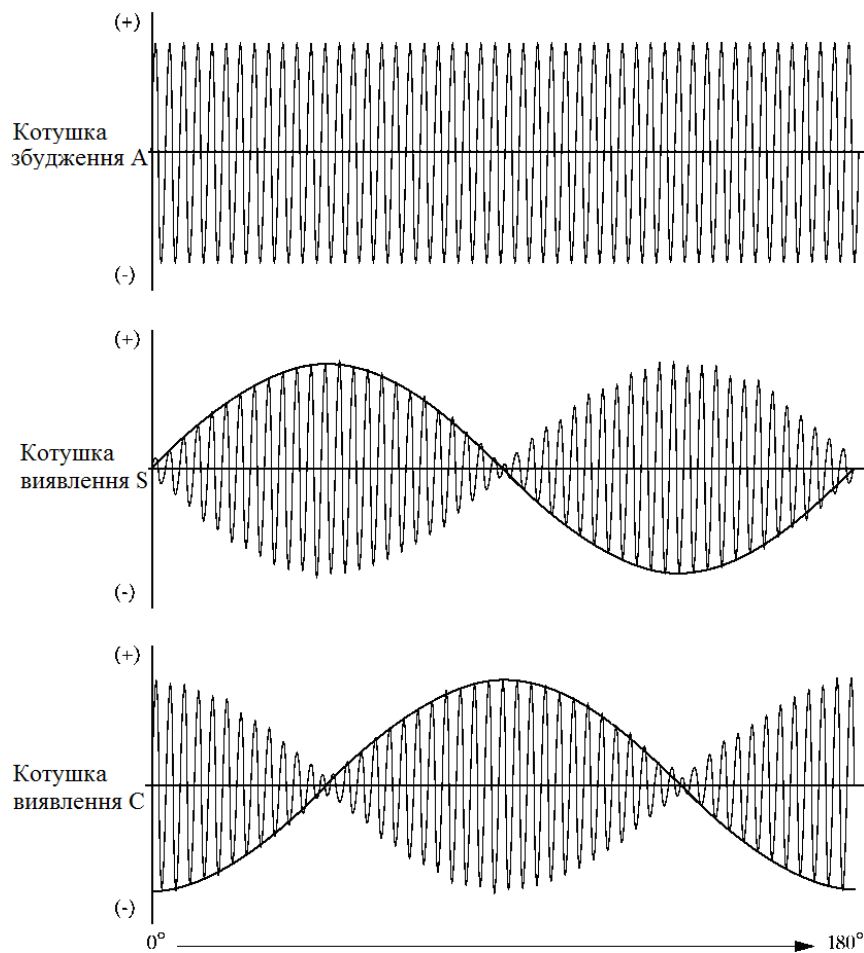


Рисунок 1.8 – Діаграма сигналів котушок при повороті ротора на 180°

Контролер кола високої напруги керує живленням електричних машин MG1 і MG2. Електричний генератор MG1, який приводиться двигуном внутрішнього згоряння, виробляє струм високої напруги для живлення електричного двигуна MG2 і для зарядки високовольтної акумуляторної батареї. Крім того електрична машина MG1 використовується як стартер для двигуна внутрішнього згоряння.

Тяговий електричний двигун MG2 одержує живлення від генератора MG1 або від високовольтної батареї і призначений для приводу ведучих коліс. Крім того електрична машина MG2 виробляє енергію для зарядки високовольтної батареї в режимі рекуперативного гальмування або в режимі руху накатом.

Тяговий електричний двигун MG2 одержує живлення від генератора MG1 або від високовольтної батареї і призначений для приводу ведучих коліс. Крім того електрична машина MG2 виробляє енергію для зарядки високовольтної батареї в режимі рекуперативного гальмування або в режимі руху накатом.

Електрична машина, що працює в режимі двигуна, одержує живлення від акумуляторної батареї через перетворювач напруги. Для створення тягового зусилля контролер електричних машин, за командою контролера кола високої напруги, вмикають і вимикають шість біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT), що підключають та відключають живлення трьох фаз статора вентильного двигуна (рисунок 1.9).

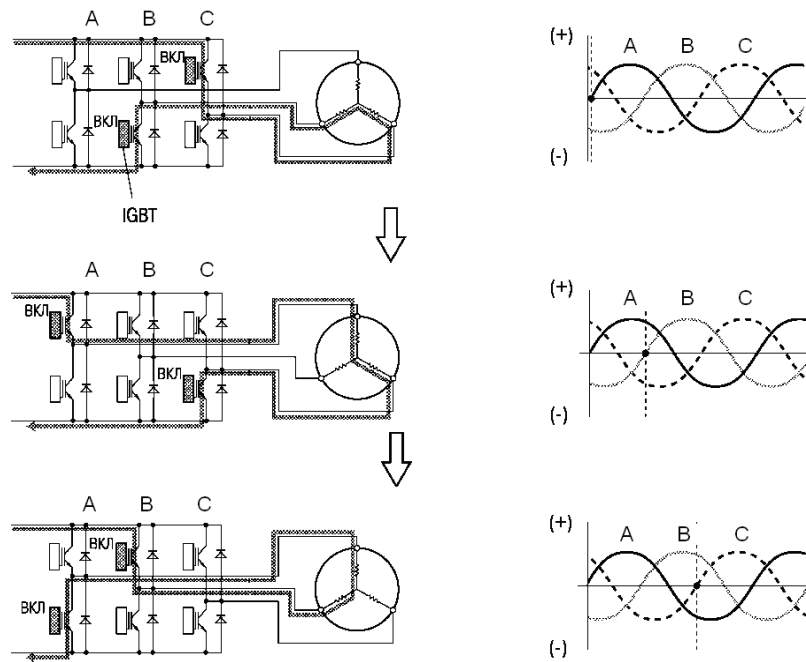


Рисунок 1.9 – Керування роботою електричної машини у режимі двигуна

Порівняльні механічні характеристики електричних двигунів у складі гібридних силових установок Toyota Prius (THS) и Toyota Prius II (THS II) наведені на рисунку 1.5.

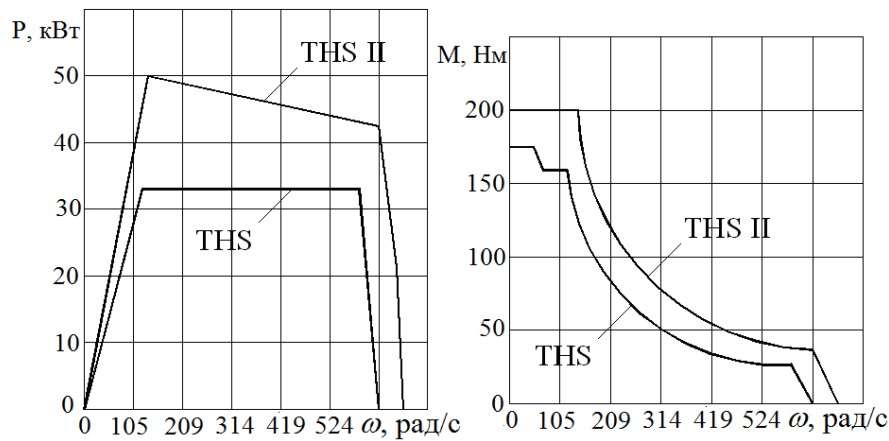


Рисунок 1.5 – Порівняльні механічні характеристики тягових електричних двигунів Toyota Prius и Toyota Prius II

Механічна характеристика (дивись рисунок 1.5) показує, що вентиляльні двигуни реалізують максимальний обертовий момент на низькій частоті обертання, на відміну від ДВЗ, які здатні генерувати максимальний обертовий момент лише на підвищеній частоті обертання. Тому навіть відносно невисока додаткова потужність електродвигуна дозволить значно покращити динамічні характеристики автомобіля.

1.4 Перетворювач напруги

Перетворювач напруги є інвертором змінно-постійної напруги для узгодження змінної напруги генератора з постійною напругою високовольтної акумуляторної батареї, і навпаки, для узгодження постійної напруги високовольтної акумуляторної батареї зі змінною напругою тягового електричного двигуна. Крім цього цей блок може мати в своєму складі високовольтний перетворювач для підвищення напруги, що йде від блоку акумуляторних батарей до електричних машин. Високовольтна акумуляторна батарея є джерелом енергії для тягового електричного двигуна.

В гібридній технології Hybrid Synergy Drive використовується перетворювач напруги для живлення електричних двигунів MG1 і MG2. Перетворювач напруги є інвертором і конвертером. Інвертування перетворює постійну напругу

високовольтної акумуляторної батареї в змінну, яке використовується для приводу тягового електричного двигуна. Конвертер перетворює змінну напругу в постійну, яке використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї гібридної силової установки і, крім того, знижує його до 12 В для живлення стандартного електрообладнання автомобіля та додаткової акумуляторної батареї.

До складу перетворювача напруги входить перетворювач, який підвищує постійну напругу акумуляторної батареї і інвертор, який перетворює постійну напругу в змінну (рисунок 1.6).

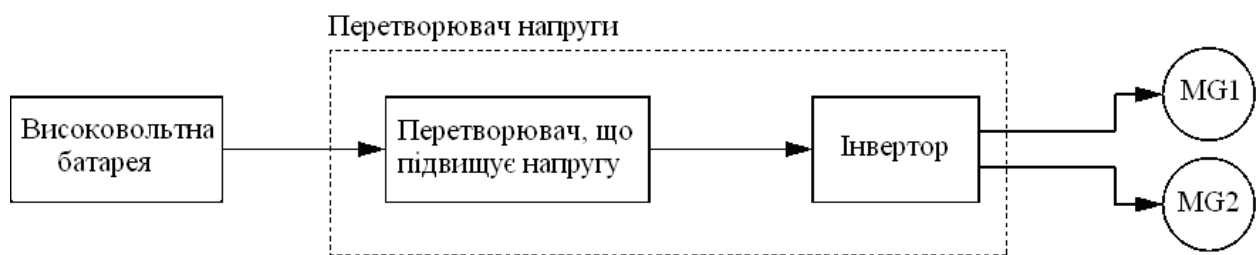


Рисунок 1.6 – Схема живлення електричних машин MG1 і MG2

Перетворювач напруги, що підвищує постійну напругу включає інтегральний силовий блок (ІРМ), в якому знаходяться перемикаючі біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) і реактор, що служить накопичувачем енергії. Ці компоненти використовуються для підвищення постійної напруги живлення.

Контролер електричних машин передає на контролер кола високої напруги данні, необхідні для керування автомобілем, такі як сила струму на виході інвертора, температура інвертора, помилки та несправності. Контролер електричних машин приймає від контролера кола високої напруги данні, необхідні для керування електричними машинами, такі, наприклад, як необхідне значення обертового моменту. Схема функціональна перетворювача напруги Toyota Prius наведена на рисунку 1.7.

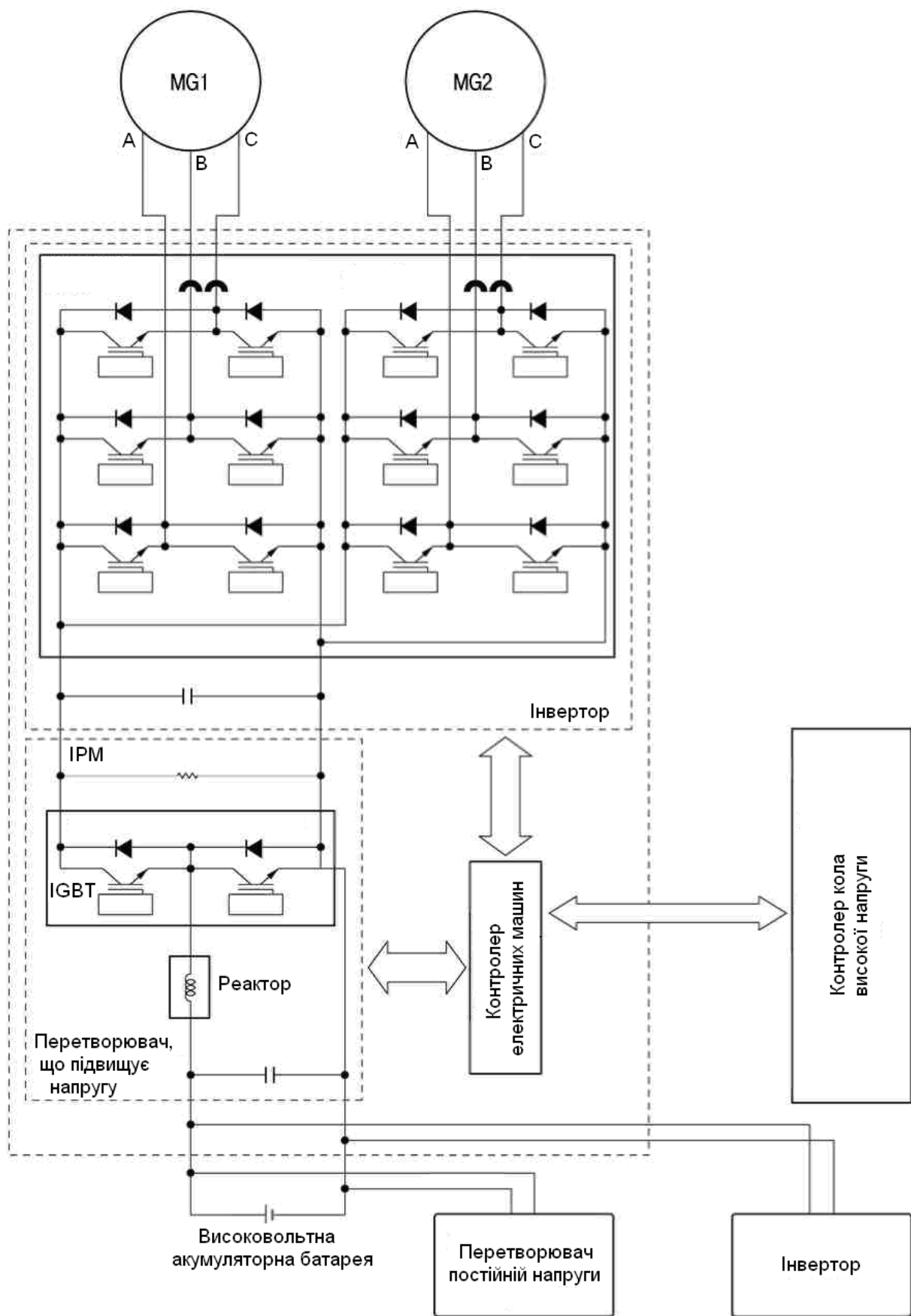


Рисунок 1.7 – Схема функціональна перетворювача напруги

Перетворювач постійної напруги, за командою контролера кола високої напруги, через контролер електричних машин, підвищує номінальну напругу батареї з 288 В до максимального значення 650 В. Інвертор перетворює змінну напругу, що виробляється електричним генератором MG1 або MG2, у постійну напругу. Перетворювач постійної напруги, за командою контролера кола високої напруги, через контролер електричних машин MG, знижує максимальну напругу з 650 В до номінальної напруги 288 В для зарядження високовольтної батареї.

Основними компонентами перетворювача постійної напруги є інтегрований силовий модуль (IPM) з біполярними транзисторами (IGBT), які виконують функцію перемикачів, і реактор, що накопичує і віддає енергію. Підвищення номінальної постійної напруги 288 В до максимальної постійної напруги 650 В відбувається таким чином. При вмиканні IGBT (2) високовольтна батарея (номінальна напруга 288 В) віддає енергію в реактор (рисунок 1.8).

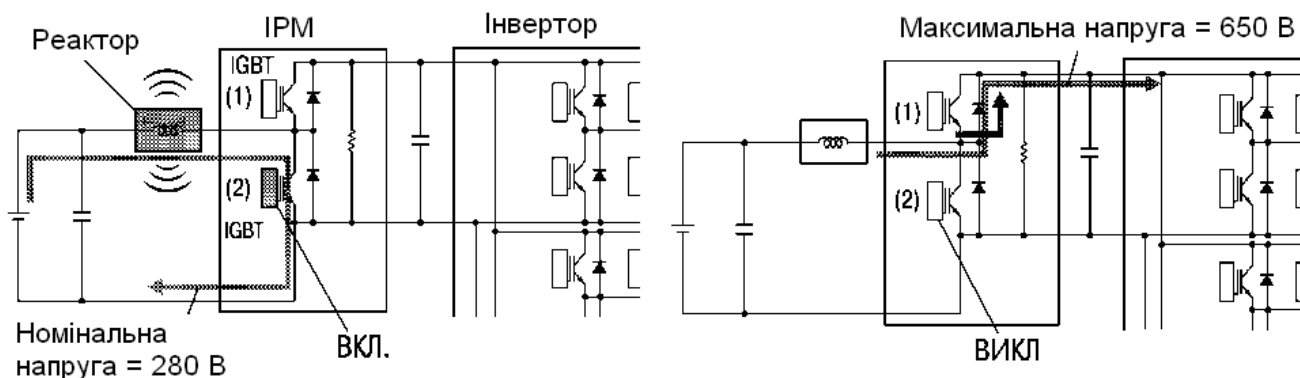


Рисунок 1.8 – Процес підвищення напруги до максимальної 650 В

В результаті починає збільшуватися напруга на реакторі. Коли напруга на реакторі збільшується до 650 В транзистор IGBT (2) вимикається і виникає ЕРС самоіндукції. Енергія, створена за допомогою ЕРС самоіндукції, поступає з реактора в інвертор. Зниження максимальної постійної напруги 650 В до номінальної постійної напруги 288 В відбувається таким чином (рисунок 1.9).

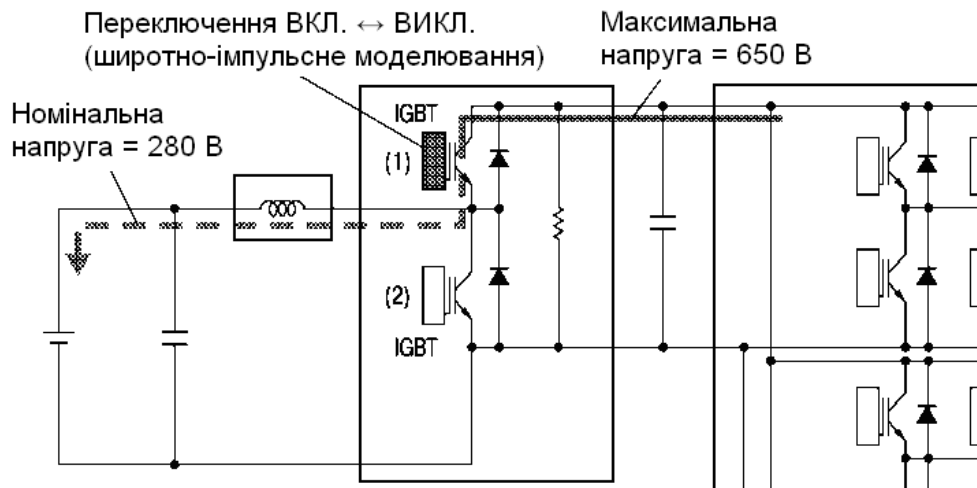


Рисунок 1.9 – Процес зниження напруги до номінальної 280 В

Змінна напруга, яка виробляється електричними генераторами MG1 або MG2 для зарядки високовольтної батареї, в інверторі перетворюється в постійну напругу 650 В. Потім перетворювач напруги знижує його значення до 288 В. Зниження напруги досягається широтно-імпульсною модуляцією, яку виконує транзистор IGBT (1). Контролер кола високої напруги постійно спостерігає за рівнем зарядки високовольтної акумуляторної батареї, за її температурою, за температурою охолоджуючої рідини системи охолодження електричних силових пристроїв і за величиною електричного навантаження. Якщо при включеному сигналізаторі READY (стан готовності) і селекторі в положенні Р, або при русі заднім ходом, будь-який з перерахованих параметрів не відповідатиме встановленим вимогам, то контролер кола високої напруги віддає команду на запуск двигуна внутрішнього згоряння, щоб привести до руху електричний генератор MG1 з метою заряду акумуляторної батареї.

Перетворювач напруги, як і електричні машини MG1 і MG2, охолоджуються примусово, за допомогою рідинної системи охолодження з циркуляційним насосом охолоджуючої рідини. Ця система охолодження працює незалежно від системи охолодження двигуна внутрішнього згоряння і включається, коли коло живлення переходить в стан READY.

Коли електричні машини MG1 та MG2 працюють в режимі генератора, інвертор перетворює змінну напругу в постійну, після цього перетворювач

постійної напруги знижує цю напругу до величини, яка використовується для заряду високовольтної акумуляторної батареї. Узгоджує роботу гібридної трансмісії на всіх режимах роботи планетарний механізм та система керування.

1.5 Система керування

Контролер електричних машин керує роботою інвертора і перетворювача, що підвищує напругу (дивись рисунок 1.11), щоб забезпечити ефективну роботу MG1 і MG2 в режимах генератора або двигуна.

Контролер електричних машин передає на контролер кола високої напруги данні, необхідні для керування автомобілем, такі як сила струму на виході інвертора, температура інвертора і виниклі несправності. Контролер електричних машин приймає від контролера кола високої напруги данні, необхідні для керування електричними машинами, такі, наприклад, як необхідне значення обертового моменту.

Контролер кола високої напруги постійно спостерігає за рівнем зарядки високовольтної акумуляторної батареї, за її температурою, за температурою охолоджуючої рідини системи охолодження електричних силових пристроїв і за величиною електричного навантаження. Якщо при включеному сигналізаторі READY і селекторі в положенні P, або при русі заднім ходом, будь-який з перерахованих параметрів не відповідатиме встановленим вимогам, то контролер кола високої напруги віддає команду на запуск двигуна внутрішнього згорання, щоб привести до руху електричний генератор MG1 з метою заряду високовольтної акумуляторної батареї.

Підвищення екологічної чистоти автомобіля досягається за рахунок оптимізації процесу рекуперації енергії і зниження витрати палива. Система керування гібридною трансмісією вимикає двигун внутрішнього згорання на холостому ході, а також, коли двигун знаходиться в зоні високих питомих витрат палива, використовуючи для руху тяговий електричний двигун MG2. Коли умови для роботи двигуна внутрішнього згорання сприятливі (низька питома витрата

палива), обертовий момент двигуна використовується для руху транспортного засобу і для приводу електричної машини MG1, яка працює в режимі генератора.

Таким чином, система керування міняє поєднання і напрям обертових моментів усередині коробки передач, добиваючись високої паливної економічності, а, отже, і високої екологічної чистоти.

Система керування оптимальним чином поєднує тягові зусилля двигуна внутрішнього згоряння, електричних машин MG1 і MG2 відповідно до умов руху автомобіля.

1.6 Система охолодження

Підтримання робочої температури різноманітних компонентів системи в допустимих межах досягається використанням системи охолодження з двома окремими етиленовими гліколями.

Розміщення системи охолодження гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius зображено на рисунку 1.12.

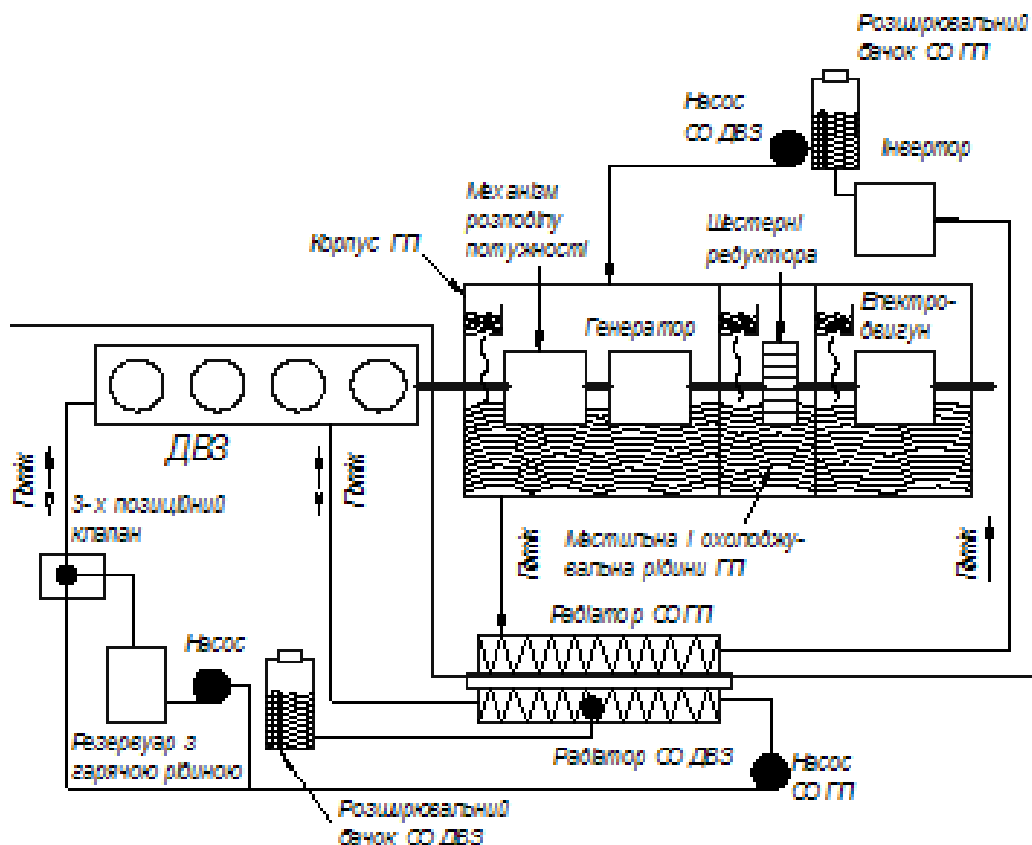


Рисунок 1.12 – Система охолодження і змащення автомобіля Toyota Prius

Система охолодження ДВЗ подібна системі охолодження в традиційному автомобілі. Її мета – поширювати охолоджувальну рідину через двигун, щоб видалити надлишкову теплову енергію, утворену при згорянні палива в ДВЗ. Насос змушує рідину рухатись від двигуна до радіатора, де непотрібна висока температура розсіюється. Щоб перешкоджати витіканню рідини, вона рухається по замкнутому контуру, який загерметизований автоматичним клапаном тиску (кришка радіатора).

Завдяки клапану створюється тиск трохи вищий за атмосферний, що, таким чином, запобігає кипінню рідини навіть при температурі вищій точки кипіння. Для забезпечення змін в об'ємі, викликаних підвищенням температури і коливаннями тиску, в системі передбачається додатковий резервуар. Передбачено також використання резервуару для зберігання гарячої рідини, яка використовується при повторному пуску двигуна. При цьому зменшується викид випускних газів, порівняно з холодним пуском.

Система охолодження гібридного електроприводу є відокремленою від системи охолодження ДВЗ, так як ці дві системи працюють в різних температурних режимах. Приведена в рух електричним насосом, охолоджувальна рідина протікає безперервно через електродвигун, генератор, інвертор, радіатор. Висока температура, відібрана у електричних компонентів віддається в атмосферу через радіатор. Як і в системі охолодження ДВЗ, система охолодження гібридного електроприводу також має резервуар, який враховує розширювальні властивості рідини.

Інвертор, як і електричні машини MG1 і MG2, охолоджується системою охолодження з радіатором, яка діє незалежно від системи охолодження двигуна внутрішнього згорання (рисунок 1.13).

Електричні машини MG1 і MG2, а також перетворювач напруги, охолоджуються примусово, за допомогою рідинної системи охолодження з

циркуляційним насосом охолоджуючої рідини (дивись рисунок 1.13). Ця система охолодження працює незалежно від системи охолодження двигуна внутрішнього згоряння і включається, коли коло живлення переходить в стан READY.

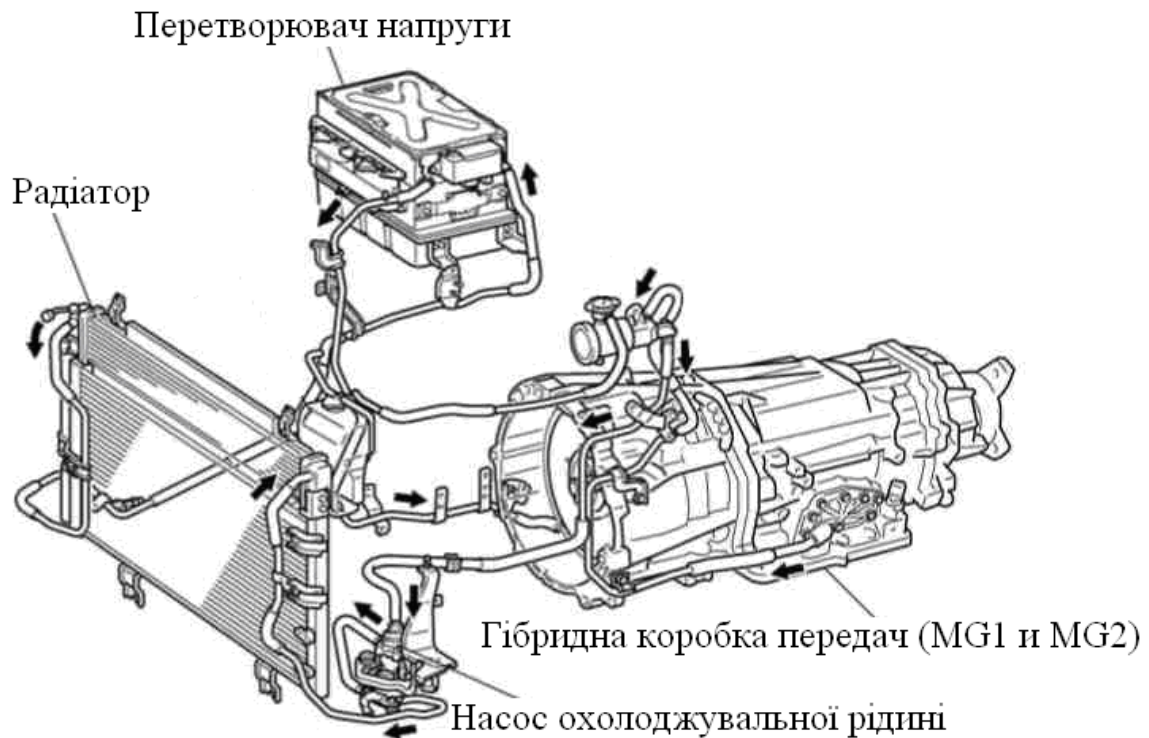


Рисунок 1.13 – Система охолодження електричних двигунів

Таким чином, проведено дослідження основних компонентів гібридної силової установки, яка проведено на прикладі гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius. Проведемо дослідження теплових характеристик гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius.

1.5 Переваги та недоліки гібридної силової установки Toyota Prius

Проведе дослідження свідчить, що на сьогоднішній час найбільш вдалою є послідовно-паралельна гібридна технологія Hybrid Synergy Drive, за якою побудована гібридна силова установка автомобіля Toyota Prius. Тому дослідження

компонентів гібридних силових установок проведемо на прикладі цієї системи, яка має високу ефективність в порівнянні з іншими серійними силовими установками (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Порівняльна енергетична ефективність силових установок

Автомобілі с різними типами силових установок	ККД енергоносіїв (джерело – бак / ТАБ), %	ККД автомобіля (бак / ТАБ – колесо), %	ККД (джерело – колесо), %
Сучасні автомобілі з бензиновими двигунами	88	16	14
Toyota Prius	88	32	28
Toyota Prius II	88	37	32
Toyota Prius PHV	88	44	38
Електромобілі	83	68	54

Аналіз та дослідження гібридного транспортного засобу Toyota Prius показав основні його переваги в порівнянні зі звичайним автомобілем:

- висока економічність, яка отримана за рахунок режиму електромобіля та за рахунок синергетичного використання електричного двигуна та економічного ДВЗ, що працює по циклу Аткинсона;
- задовільні динамічні характеристики;
- низький рівень забруднення атмосфери (у порівнянні з традиційним автомобілем Prius викидає в атмосферу на 85 % менше незгорілих вуглеводнів C_nH_m і окислів азоту NO_x);
- низький рівень шуму;
- низький аеродинамічний опір;
- наявність двох незалежних систем гальмування – гідравлічної та рекуперативної.

Аналіз гібридного автомобіля Toyota Prius виявив деякі його недоліки:

- більш висока ціна, ніж у звичайних автомобілів того ж класу. У багатьох країнах, однак, висока ціна частково компенсується податковими пільгами. Крім того, різницю в цінах частково або повністю компенсує економія бензину;

- при низьких температурах погіршуються властивості тягових акумуляторних батарей (ТАБ);

- в холодну пору року переваги гібридного приводу можуть зменшуватися за рахунок того, що ДВЗ працює майже завжди, виробляючи енергію для обігріву салону. Традиційні автомобілі обігрівають салон, відбираючи тепло з системи охолодження, яка при непрацюючому двигуні остигає за кілька десятків хвилин;

- невисока ефективність рекуперативного гальмування;

- автомобіль не рекомендується залишати без руху на строк більше 3 міс. через можливу розрядку акумуляторних батарей;

- висока динаміка досяжна лише на малих швидкостях, так як при високих швидкостях все навантаження припадає на малопотужний двигун внутрішнього згоряння;

- безшумність автомобіля може бути небезпечною для сліпих або неуважних пішоходів;

- мала кількість фахівців з ремонту і автосервісів, які ремонтують гібридні автомобілі.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ TOYOTA PRIUS

2.1 Постановка задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності силових установок гібридних транспортних засобів за рахунок дослідження ККД компонентів гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive Toyota Prius. Для досягнення мети охарактеризуємо функціональні характеристики гібридної системи електроприводу і проаналізувати алгоритм побудови, використаний в конструкції основних складових, особливо тяговому електричному двигуні, інверторі, генераторі і системі охолодження [5-14].

Основною задачею дослідження є визначення експлуатаційних показників компонентів гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive Toyota Prius і дати кількісну оцінку корисної дії при сумісній роботі наступних компонентів:

- генератор і інвертор;
- електродвигун і інвертор;
- конвертер підвищувальний (перетворювач напруги) і високовольтна тягова акумуляторна батарея (ТАБ).

Досліджувані змінні, які були виміряні і ідентифіковані наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Перемінні величини для програми дослідження

Тип змінної	Позначення змінної	Опис змінної
Потужність генератора	P_G	Електрична
Вихідна потужність електродвигуна (до коліс)	P_{ED}	Механічна
Вихідна потужність інвертора (до електродвигуна)	$P_{ИНВ}$	Електрична
Підвищувальна потужність	$P_{ПДВ}$	Електрична
Потужність акумуляторної батареї	$P_{АКБ}$	Електрична

Кожне дослідження проводилося з вимкненими інвертором компресора повітряного охолодження і допоміжним 12 В конвертером постійного струму.

Необхідне пришвидшення і постійна швидкість в процесі дослідження встановлюється положенням педалі акселератора на відстані від установки. Бігові барабани встановлюються так, щоб була змога контролювати викиди транспортного засобу при різних циклах руху. Дослідження гібридної системи електроприводу вимагає контролю зусиль, що створюються додатковими електричними машинами, які входять до складу транспортного засобу Крім цього дослідження вимагають дуже точних силових вимірювань, щоб повністю охарактеризувати робочі характеристики гібридної силової установки.

2.2 Опис лабораторного обладнання

Лабораторна установка для дослідження гібридної силової установки електроприводу визначає струм і напругу в різних точках системи. На рисунку 2.1 зображено схему електричної системи Hybrid Synergy Drive Toyota Prius і розміщення встановлених датчиків.

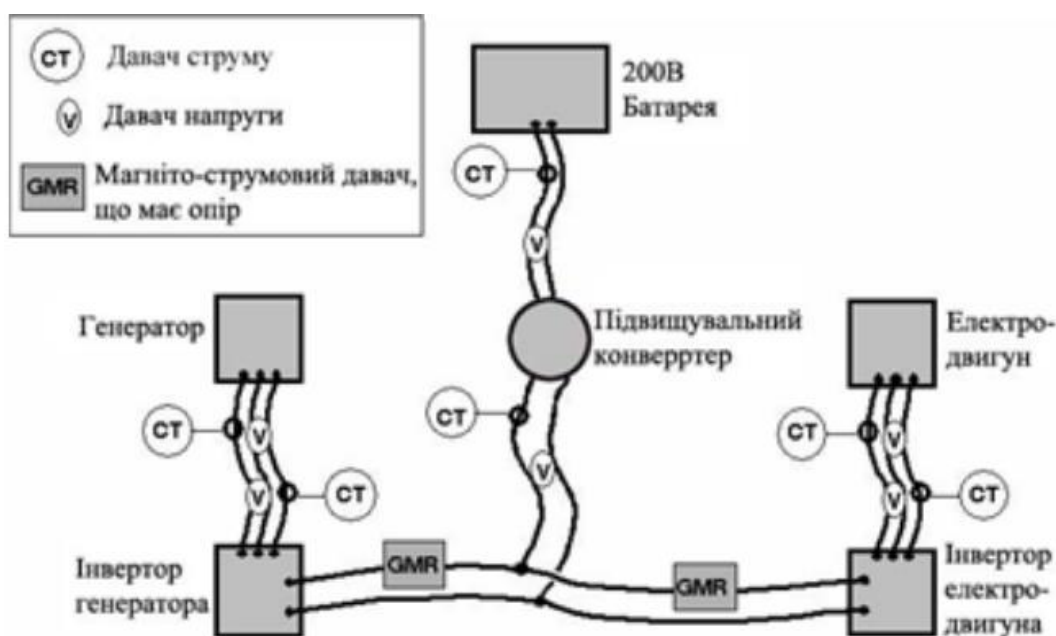


Рисунок 2.1 – Розміщення датчиків при дослідженні

Залежність даних, що визначаються в процесі дослідження, від часу наведено на рисунку 2.2.

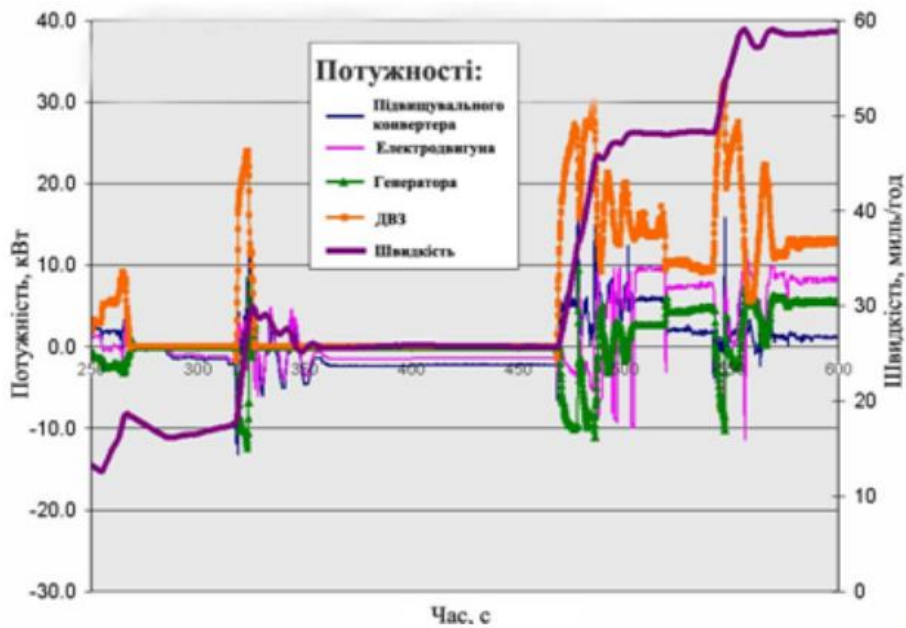


Рисунок 2.2 – Типові силові вимірювання при зміні швидкості

Ця характеристика показує потік потужності в різних частинах гібридної системи електроприводу зі зміною швидкості транспортного засобу, вказаної на графіку. З графіка можна побачити, що потужність ДВЗ зростає, коли транспортний засіб пришвидшується до високих швидкостей і знижується, аж до нуля, коли швидкість транспортного засобу постійна, що дозволяє таким чином приводити в рух автомобіль від електродвигуна без допомоги ДВЗ. На найвищих швидкостях ДВЗ і електродвигун одночасно віддають потужність для приводу транспортного засобу.

Схема лабораторного обладнання для дослідження робочих характеристик гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive Toyota Prius застосовується для вимірювання теплових і електричних параметрів в реальному часі, для отримання і зберігання даних за допомогою автоматичних аналізаторів Yokogawa PZ 4000 і збору даних Keithley 2700. Система охолодження із зворотнім зв'язком використовується, щоб регулювати температуру і розхід охолоджуючої рідини, яка відправляється інвертору і вентиляльному синхронному двигуну з постійними магнітами на роторі.

Електродвигун для цих випробувань був змінений так, щоб ротор безпосередньо з'єднувався з валом динамометра, що дозволило валу динамометра

обертатися разом із ротором електродвигуна. Це виключає проблеми, пов'язані з втратами потужності в зачепленнях шестерень. На рисунку 2.3 показано фотографію лабораторної установки і елементів, які тестуються на кінцевому етапі випробувань гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive Toyota Prius.



Рисунок 2.3 – Лабораторна установка для дослідження робочих характеристик

В кінці випробувань двигун Solectria замінили синхронним двигуном фірми UQM, щоб забезпечити додаткове навантаження на великих швидкостях.

Вимірювальні дані були отримані від великої кількості датчиків і автоматичного аналізатора. Вловлювач крутного моменту фірми Himmelstein встановлений між електродвигуном і динамометром. Він забезпечує навантаження вала електродвигуна. Також встановлено зовнішнє обладнання для вимірювання і регулювання температури охолоджуючої рідини. Результати досліджень електродвигуна отримані, використовуючи систему автоматичних аналізаторів Yokogawa PZ 4000. Датчики, розташовані в інверторі, магнітному статорі синхронного електродвигуна, кріпленнях динамометра, забезпечують отримання електричних і теплових величин.

2.3 Загальний план випробувань

Випробування обмежувалися максимальною частотою електродвигуна 6000 об/хв, і, з даних виробника, – довготривалою потужністю 30 кВт і максимальною потужністю 50 кВт при частоті від 1200 об/хв до 5000 об/хв для часу 20 с.

Експериментальні дані співпадають з даними виробника, що наведені на рисунку 1.5. Максимальний крутний момент становить 400 Н·м при обертах двигуна до 1200 об/хв (рисунок 2.4), причому це значення обмежується часом.

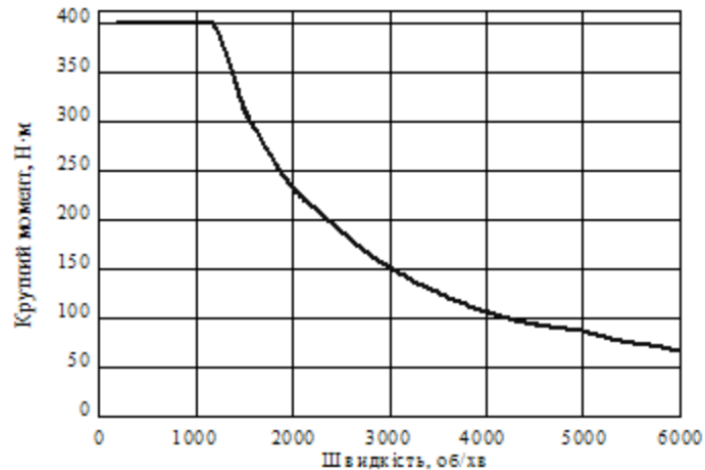


Рисунок 2.4 – Залежність максимального значення крутного моменту від частоти обертів електродвигуна

Як показують дані випробувань, при помірному міському їздовому циклі температура в системі охолодження перебувала у межах від 50 °С до 60 °С в більшості необхідних їздових циклів. Тому прийнята середня температура системи охолодження 55°С.

В гібридній силовій установці Hybrid Synergy Drive Toyota Prius встановлений тепловий захист статора при температурі 174°С, що показує клас Н захисту охолодження електродвигуна. Клас Н дозволяє нагрівання до 180 °С при середньому часі роботи електродвигуна 20000 год. Дані показують, що при нагріванні електродвигуна до температури 200 °С його час роботи скорочується до 5000 год.

Значення температур елементів системи приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення температур елементів системи

Параметр	Значення	Обґрунтування
Максимальна температура охолоджуючої оливи, °С	від 60 до 170	Для підтримання ефективного охолодження

Максимальна температура обмотки статора, °С	200	Підняття границь
Нормальна температура в системі охолодження, °С	65	Згідно даним виробника
Типова температура в системі охолодження, °С	55	Згідно експериментів
Мінімальна витрата охолоджуючої рідини згідно виробника, л/хв	10	Згідно даним виробника
Фактична витрата охолоджуючої рідини, л/хв	10,6	Використовується насос

В системі гібридного приводу використовуються двигуни не стабільні в роботі. Електродвигун повинен розвивати крутні моменти від 300 Н·м до 400 Н·м тільки на декілька секунд в процесі високого пришвидшення. Тому двигун не призначений ні для чого більше. Проте для дослідження і побудови карт робочих характеристик необхідно працювати в високому діапазоні крутного моменту при тривалому часі. Тому, при випробуваннях, для захисту статора від перегріву, встановлюється швидша циркуляція охолоджуючої рідини, а в деяких випадках і дуже висока.

При випробуванні робочих характеристик інвертора і електродвигуна температура рідини становила 55 °С при витраті 7 л/хв. При випробуваннях високого крутного моменту температура рідини знижувалась, а її витрата зростала до 10 л/хв. Вентилятор направлений на кожух електродвигуна для реальної імітації руху транспортного засобу. Керування струмом інвертора проводилось на основі алгоритмів регулятора. Випробування проводилось при змінах швидкості і навантаження електродвигуна в кілька етапів. При малих швидкостях обертання ротора, вимірювання проводили через кожні 100 об/хв, при високих швидкостях, коли ефективність змінюється більш поступово, шаг вимірювання збільшується до 500 об/хв. При кожній швидкості крутний момент збільшували в декілька етапів.

Дані реєструвалися кожні 10 Н·м для навантаження до 120 % від номінального, причому температурні границі не порушувались. В кожній точці швидкості і крутного моменту вимірювався постійний струм для того щоб знайти

мінімальний необхідний рівень, якому відповідає найвища ефективність електродвигуна. Кожна точка вимірювання не утримувалась довше 30 с, якщо температурні границі могли бути порушені. При вимірюванні 10 чи більше точок, використовувались середні значення для виключення ефекту розсіювання. Струм інвертора і форми хвилі напруги були зареєстровані при роботі електродвигуна на частотах 1200 об/хв і 2500 об/хв з максимальним номінальним крутним навантаженням.

Незалежно від швидкості і електричної частоти, використовувався діапазон, що містить щонайменше п'ять фундаментальних циклів для кожної випробувальної швидкості. Це забезпечує те, що інформація не пропущена і потужність вимірюна послідовно. Щоб забезпечити додаткову послідовність, автоматичний аналізатор під'єднувався до однієї із фаз змінного струму. Так як частота замірів змінюється з тривалістю вимірювань і швидкістю випробувань, то визначена тривалість вимірювань не використовувалася в процесі всіх випробувань, але може бути приближена для отримання вимірювань з частотою 2,5 зразка за секунду. Програма отримання і накопичення даних записувала дані із множини давачів кожні 5 с. Для кожної швидкості і крутного моменту було отримано щонайменше 5 результатів, кожен з яких записувався в рядки великоформатної таблиці. Тому, після проведення експерименту отримані дані співставлялися і перевірялися; результати, що відповідали вірним, зареєстровувалися. Крім цього, дані для кожної операції були усереднені і карта ефективності, зображена нижче, побудована використовуючи середні значення.

На протязі випробувань інвертора, при визначених швидкостях і навантаженнях, отримані дані, що засвідчують високу ефективність інвертора в межах 99 %, що виявилось неочікуваним. Оскільки використовувались тільки відрегульовані інструменти і давачі, то похибка (якщо така існує) могла бути викликана тільки шумами електромагнітних хвиль, що спостерігаються в сигналах вихідного струму інвертора. Визначено декілька рішень і спеціальних випробувань для перевірки результатів.

Для підвищення ефективності досліджень визначено зробити наступні зміни:

- отримати додаткові результати, використовуючи шунтування внутрішнього струму, щоб порівняти їх з даними результатами;
- розташувати автоматичний аналізатор і трансформатор ближче до електродвигуна і інвертора, використовуючи коротші провідники;
- використовувати трансформатор, влаштований в інвертор;
- шукати причину появи високого магнітного поля;
- дослідити той факт, що при видаленні сигналу напруги 500 В, що йде на один із входів аналізатора потужності Yokogawa, шум електромагнітного поля знижується.

Найкращий результат вищевказаного дослідження було отримано при проведенні випробувань для перевірки раніше отриманих результатів.

Спеціальні випробування включали наступне:

- використовувалося шунтування – випробування проводилися при низькому струмі і використовуючи внутрішнє шунтування приладу Yokogawa, що є, напевне, найточнішим налаштуванням для вимірювань. Три фази інвертора-двигуна були розділені через автоматичний аналізатор для випробування. Результати відповідали більш раннім випробуванням при використанні трансформатора струму на трьохфазних лініях;
- використання фільтрування – дані отримані з і без використання фільтрів не мали істотних розбіжностей при вимірюванні потужності і ефективності;
- використання псевдонеітралі – отримані дані, при використанні зовнішньої псевдо нейтралі на трифазній лінії, істотно не відрізнялися від даних, отриманих раніше при вимірюванні потужності і ефективності;
- ізоляція лінії – вхід/вихід інвертора було ввімкнено/розімкнено з аналізатором у всіх комбінаціях, щоб перевірити ізоляцію ліній. Таким чином, електричні дані подавались з входу/виходу інвертора прямо на аналізатор. І знову ніяких суттєвих розбіжностей в результатах вимірювання потужності і ефективності не спостерігалось.

Вищевказані випробування підвищили рівень оцінки і показали, що дійсно при різних навантаженнях інвертор показав високу ефективність роботи. Корисна дія інвертора, як очікується, буде високою і в експлуатаційних режимах, починаючи із вибору ширини імпульсу сигналу керування і до створення максимальної напруги, що подається на електродвигун.

2.4 Результати випробувань

2.4.1 Випробування системи електродвигун-інвертор і карти їх ефективності. Побудуємо карти ефективності робочих характеристик основних складових гібридній силовій установці Hybrid Synergy Drive Toyota Prius, включаючи створення карт результуючої ефективності електродвигуна та інвертора.

Найкращі результати були отримані при високих навантаженнях, оскільки були частими високі теплові зміни в статорі. Проблем з перегрівом не було, оскільки в інвертор інтегровано автоматичний електронний модуль. Для повного навантаження при частоті нижче 1300 об/хв використовувався допоміжний синхронний двигун, що додавав навантаження до динамометра. Контурна карта ефективності використання електродвигуна в межах від 300 об/хв до 6000 об/хв зображена на рисунку 2.5.

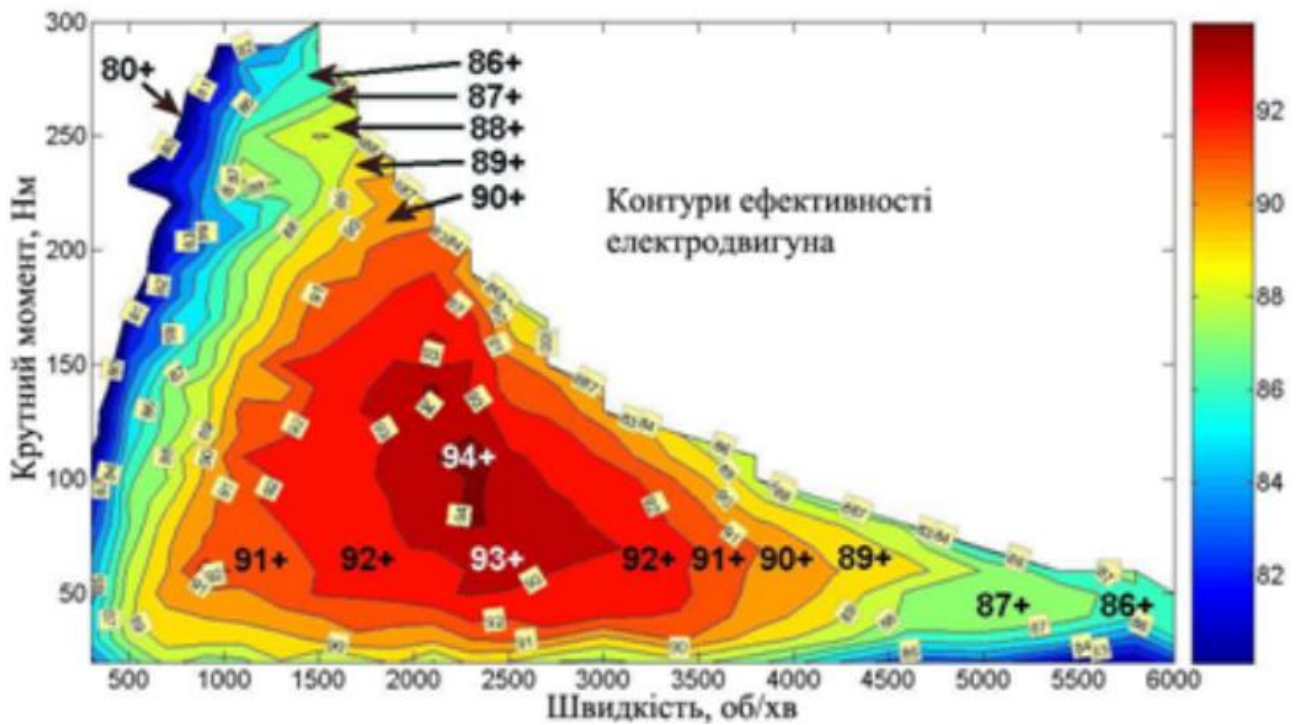


Рисунок 2.5 – Контурна карта ефективності електродвигуна

Як видно з рисунку 2.5 максимальна ефективність сягає 94 % при обертах вентиального електричного двигуна від 1750 об/хв до 3000 об/хв для помірних значень крутного моменту від 50 Н·м до 150 Н·м. Найнижчі ККД спостерігаються в кількох областях краю контуру, особливо при малих швидкостях і високих значеннях крутного моменту. Так як одним із першочергових застосувань електричного двигуна було пришвидшувати транспортний засіб, то такий ефект при низьких швидкостях має велике значення.

Контурна карта ефективності інвертора в межах від 300 об/хв до 6000 об/хв показана на рисунку 2.6. З карти видно, що область високих ККД інвертора, близько до 99 %, лежить вище 1800 об/хв.

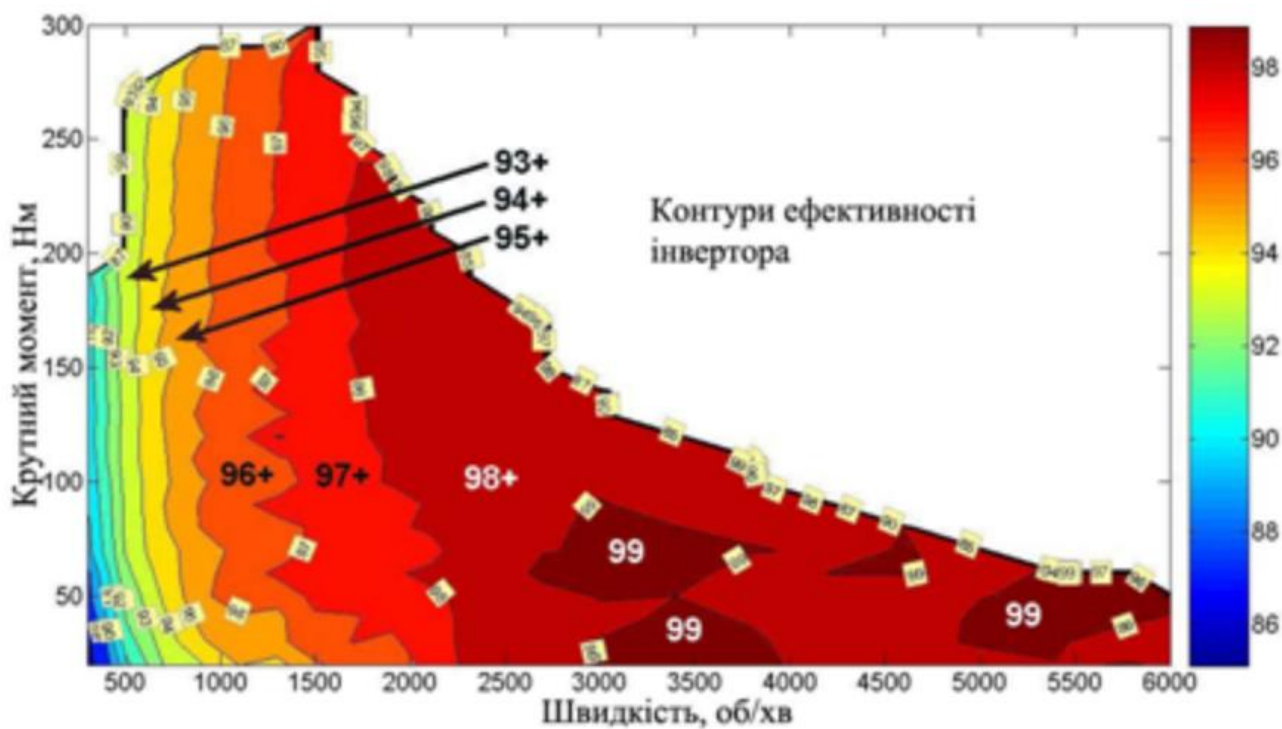
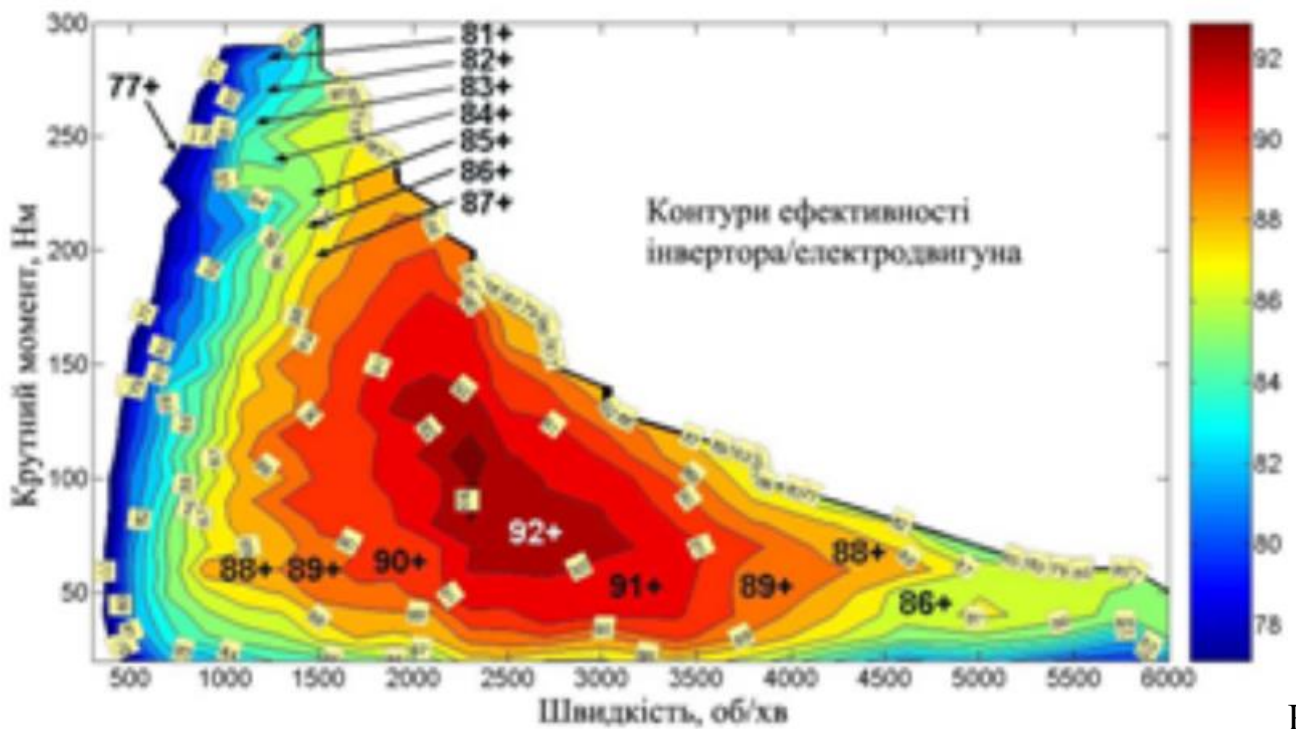


Рисунок 2.6 – Контурна карта ефективності інвертора

Хоча межі позначають зміну ККД на 1 %, проте ККД, позначені як 99, мали ефективність 99 % в 23 точках швидкості/крутного моменту, 99,1 % – в 13 положеннях швидкості/крутного моменту, 99,2 % – в 6 точках швидкості/крутного моменту, вище 99,2 % – лише в одній точці. На більш низьких швидкостях електричного двигуна, ККД інвертора поступово опускається до 92 % і нижче в невеликих областях карти. Зрозуміло, що рівні крутних моментів електродвигуна в загальному мають невеликий вплив на ефективність інвертора.

Об'єднану контурну карту ефективності системи електродвигун-інвертор в межах від 400 об/хв до 6000 об/хв показано на рисунку 2.7. ККД системи електродвигун-інвертор знаходиться в межах від 92 % до 93 % при обертах електричного двигуна від 2200 об/хв до 3000 об/хв (в залежності від навантаження) і помірних значеннях крутного моменту (від 60 Н·м до 140 Н·м). Найнижчий ККД спостерігається в областях швидкості нижче 1500 об/хв, особливо при високих навантаженнях.



Р

исунок 2.7 – Об'єднана контурна карта ефективності системи електродвигун-інвертор

2.4.2 Випробування підвищувального конвертера і карти його ефективності. Цей розділ містить інформацію про підвищувальний конвертер, основу на дослідженнях системи конвертера, інвертора, електродвигуна. Випробування підвищувального конвертера було проведене при мінімальному, середньому і максимальному значеннях вихідної напруги. Робочі характеристики конвертера не були опротестовані. Вхідна напруга на підвищувальний конвертер встановлена 233 В на протязі випробувань. Ця напруга обґрунтовувалась результатами випробувань їздового циклу, які показали, що змінна напруга на вході конвертера становила близько 230 В. Напруга батареї становить 201,6 В, очевидно, що генератор відповідальний за підняття напруги в процесі руху транспортного засобу. Напруга на виході конвертера була встановлена рівною 233, 342 і 500 В, що утворює три частини випробувань.

Випробування конвертера виконувались при наступних умовах:

- частота обертання ротора електродвигуна 1500 об/хв;

- крутний момент на валу електродвигуна від 0 Н·м до 130 Н·м з приростом кожні 10 Н·м;
- механічна потужність на валу електродвигуна від 0 кВт до 20,4 кВт;
- температура електричного двигуна, конвертера і інвертора зберігалась рівною 55 °С;
- діапазон вихідної потужності підвищувального конвертера складала від 0 кВт до-25 кВт;
- питома витрата охолоджуючої рідини 7л/хв.

Рисунок 2.8 показує ефективність підвищувального конвертера при різних значеннях вихідної потужності для трьох значень вихідної напруги.

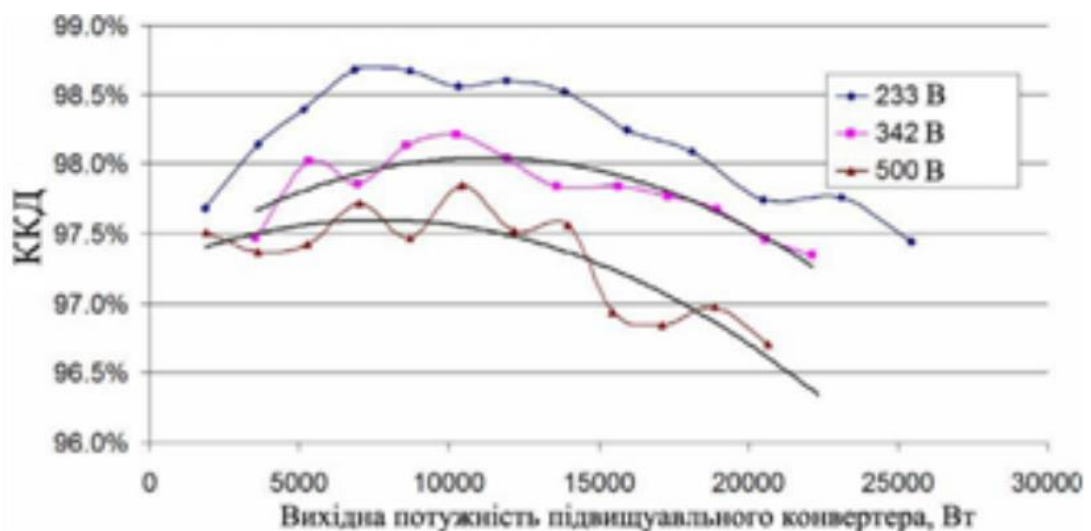


Рисунок 2.8 – Залежність ККД підвищувального конвертера від вихідної потужності

Рисунок 2.9 показує ефективність підвищувального конвертера при різних значеннях вихідного струму. В результатах видно коливання кривої, що пояснюється пристосуванням системи. Найочевидніший висновок – ефективність знижується при зростанні вихідної напруги підвищувального конвертера. Додатково, для всіх трьох вихідних напруг ККД конвертера є найнижчим при великій вихідній напрузі.

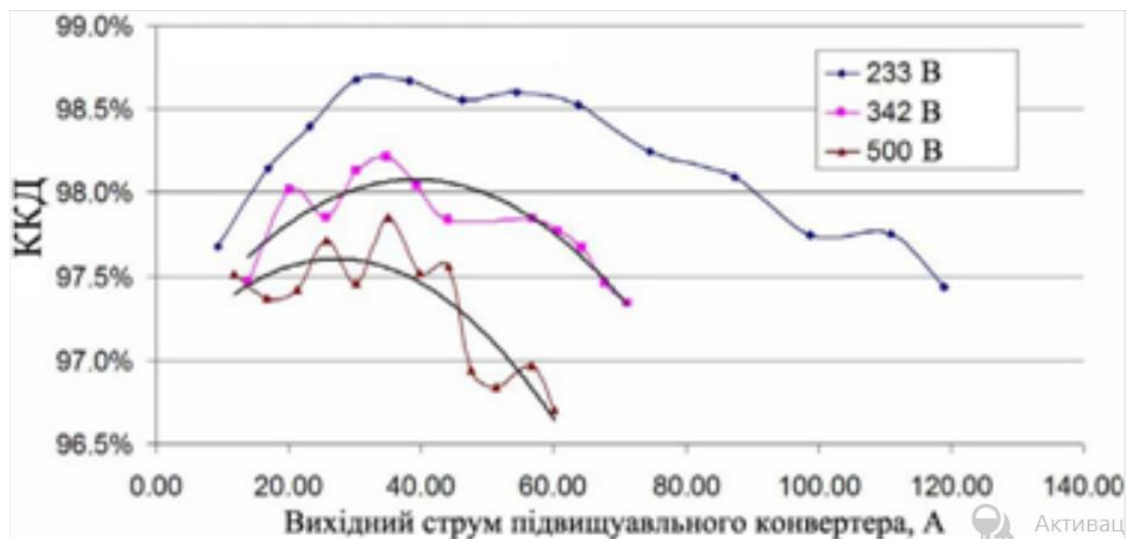


Рисунок 2.9 – Залежність ККД підвищувального конвертера від вихідного струму

2.4.3 Вимірювання втрат потужності в гібридній силовій установці. Вивчено три типи втрат потужності, які впливають на повну ефективність гібридній силовій установці. Ці втрати включають:

- втрати на тертя в зачепленнях шестерень (конфігурація А);
- втрати в роторі електродвигуна (конфігурація В);
- втрати в планетарній передачі і роторі генератора (конфігурація С).

Повні втрати потужності для всієї гібридній системи приводу виміряні при випробуваннях елементів, що входять в конфігурацію А.

Втрати, пов'язані з ротором електродвигуна виміряні при випробуваннях елементів, що входять в конфігурацію В. Це випробування проводилось при видаленні ротора електродвигуна і використанні його моделі (модель ротора складалася із фіктивного вала і підшипників, які використовувались, щоб утримувати в нормальному положенні інші елементи).

Для конфігурації С видалені додаткові елементи, включаючи ротор електродвигуна і генератора, сонячну шестерню і планетарну передачу, залишались лише головна передача, диференціал і ланцюгова передача. При цьому випробуванні стало можливим визначити втрати в передачі. Це випробування, при виключенні втрат в роторі електродвигуна і шестернях з всієї

системи гібридного приводу, дало можливість також визначити втрати пов'язані з планетарною передачею, ротором генератора і сонячною шестернею.

Визначення значень цих втрат досягається при окремому випробуванні трьох різних конфігурацій системи гібридного приводу при різних частотах обертання вала електродвигуна і температурах мастильних матеріалів. Встановлені елементи при випробуванні кожної з конфігурацій приведені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Конфігурації системи гібридного приводу при вимірюванні втрат потужності

Конфігурація	Конфігурація А	Конфігурація Б	Конфігурація В
ДВЗ	Не встановлено	Не встановлено	Не встановлено
Ротор електродвигуна	Встановлено	Видалено	Видалено
Ротор генератора	Встановлено	Встановлено	Видалено
Сонячна шестерня	Встановлено	Встановлено	Видалено
Планетарна передача	Встановлено	Встановлено	Видалено
Головна передача, диференціал, ланцюгова передача	Встановлено	Встановлено	Встановлено

Сумарні втрати в системі гібридного приводу і її компонентах при температурі оливи 25 °С зображені на рисунку 2.10 та наведені у таблиці 2.4.

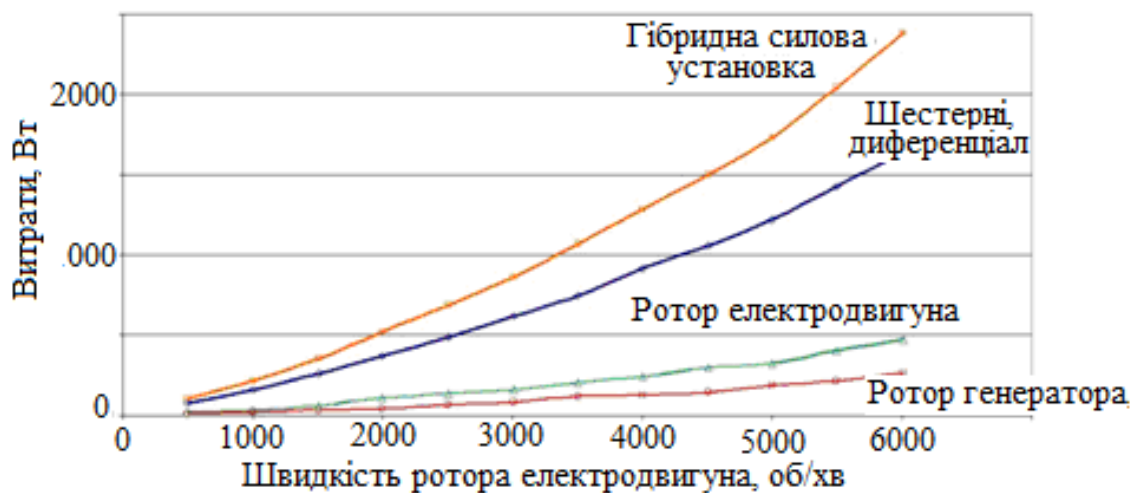


Рисунок 2.10 – Втрати в гібридній силовій установці

Таблиця 2.4 – Сумарні втрати в системі гібридного приводу

Частота обертання осі, об/хв	Частота обертання валу електро-двигуна, об/хв	Втрати в передачі, Вт	Втрати в роторі електро-двигуна, Вт	Втрати в планетарній передачі, роторі генератора і сонячній шестерні, Вт	Сумарні втрати в системі гібридного приводу, Вт
120	494	74,9	19,8	7,1	102
243	1000	158,5	31,6	23,7	214
366	1506	261,8	60,2	33,2	355
484	1991	369,8	109,0	40,5	519
608	2501	487,9	135,9	63,6	687
731	3007	617,2	161,7	84,2	863
851	3501	745,2	205,3	118,8	1069
972	3999	915,6	242,1	125,5	1283
1095	4505	1058,2	297,4	145,2	1501
1215	4999	1220,8	323,9	186,5	1731
1335	5492	1425,2	404,9	214,3	2044
1460	6006	1645,3	472,8	264,9	2383

Залежність втрат потужності від температури оливи при випробуваннях конфігурації В наведені на рисунку 2.11.

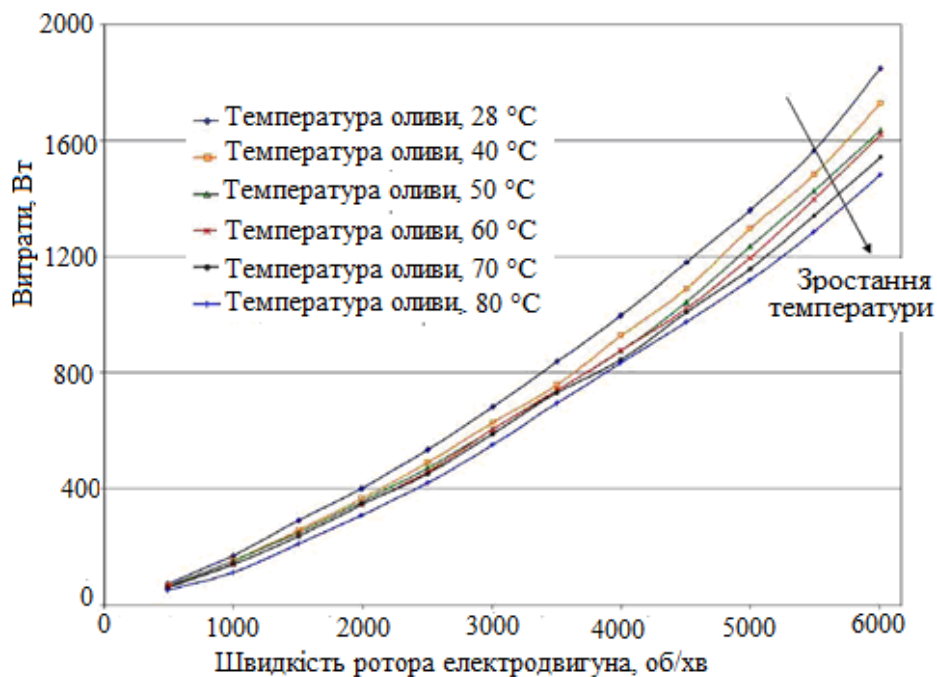


Рисунок 2.11 – Залежність втрат потужності від температури оливи при випробуваннях конфігурації В

Сім значень максимального крутного моменту для різних поточних кутів показані на рисунку 2.12.

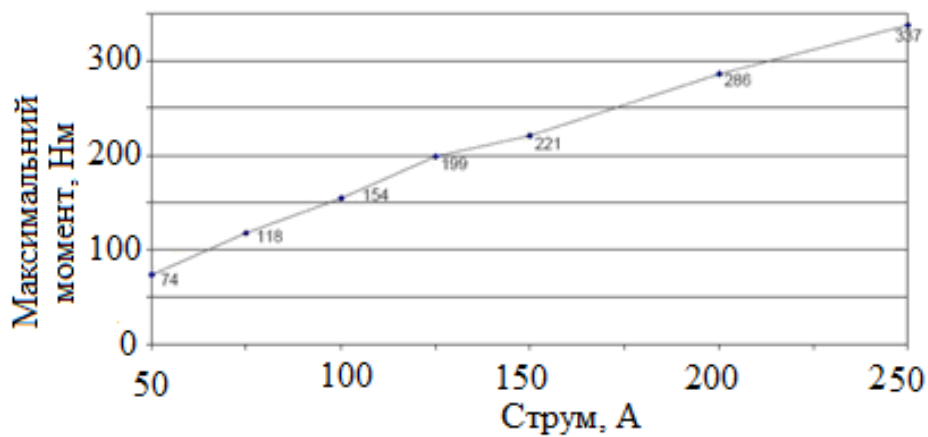


Рисунок 2.12 – Залежність максимального крутного моменту від струму при блокованому роторі

Ця серія випробувань показує високу ефективність пускової тягової характеристики електродвигуна гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive Toyota Prius. Випробування проводились при блокованому диференціалі і кімнатній температурі оливи.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Місця розташування термопар

Для визначення теплових характеристик гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius розташуємо термопари в різних місцях гібридної силової установки. На рисунку 3.1 показано місця розташування термопар для випробування електричного двигуна.



Рисунок 3.1 – Місця розташування термопари в електродвигуні

Термопари в пазах електродвигуна позначені W1, W2, і W3. Зовнішні місця розташування термопари позначені T1, T2, T3, T6, T9, T10, T11. Числа в позначеннях місця розташування термопар приблизно збігаються із положеннями годин на годиннику, якщо дивитись від кінця електродвигуна. Також встановлені термопари для визначення температури оливи і водно-етиленових гліколей.

3.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка розроблена для використання частоти 60 Гц при живленні електродвигуна не використовуючи інвертор. Це дасть гарну синусоїдальну форму хвилі для живлення електродвигуна, не беручи до уваги вплив інвертора при його роботі. Результат перегріву, отриманий від

синусоїдальної форми хвилі був би найкращим для дослідження. Оскільки частота джерела живлення рівна 60 Гц, то частота досліджуваного 8-ми полюсного електродвигуна рівна 900 об/хв.

Оцінка електродвигуна автомобіля Toyota Prius при обертанні його ротора з частотою 1200 об/хв може бути підрахована при апроксимації результатів отриманих під час дослідження ротора, що обертався з частотою 900 об/хв, що не викличе великої помилки. На рисунку 3.2 зображена схема лабораторної установки, що застосовується для дослідження теплових характеристик гібридної силової установки автомобіля Toyota Prius.

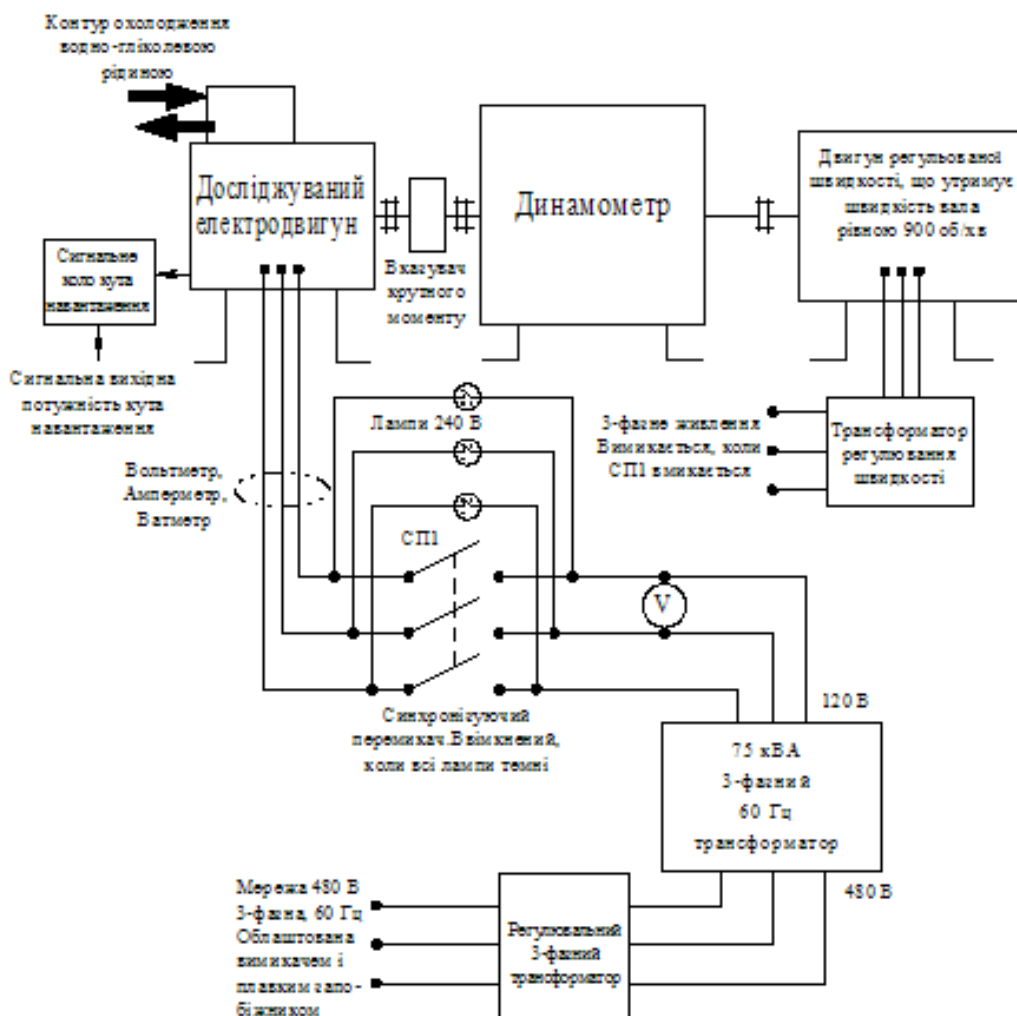


Рисунок 3.2 – Схема лабораторної установки

Електродвигун, що досліджується, зображений у вершині схеми (дивись рисунок 3.2). Його вал з'єднаний з динамометром через вказувач крутного моменту. Інший кінець динамометричного вала з'єднаний з ротором двигуна з

регульованою частотою обертання, що може утримувати частоту обертання ротора електродвигуна автомобіля Toyota Prius на позначці 900 об/хв при частоті джерела живлення 60 Гц.

Із схеми лабораторної установки видно (дивись рисунок 3.2), що струм трифазної мережі проходить через трансформатор, який понижує напругу із 480 В до 120 В. Трифазний перемикач синхронізації й три лампочки використовуються, щоб під'єднати електродвигун до електричної мережі. Перемикач синхронізації включений, коли всі три лампочки темні. Система охолодження з'єднана з регулятором температури і регулятором швидкості циркуляції водно-етилен гліколевої рідини в системі охолодження.

На рисунку 3.3 показано з'єднання валів у лабораторній установці: електродвигуна, що підтримує необхідну частоту обертів електродвигуна автомобіля Toyota Prius, динамометра, вимірювача крутного моменту.



Рисунок 3.3 – З'єднання валів у лабораторній установці

3.3 Опис джерела для живлення навантажувального електродвигуна

Щоб вивчати перегрів електродвигуна і зв'язані із ним теплові проблеми керування теплом, використовується електроживлення частотою 60 Гц, що

забезпечує синусоїдальну форму хвилі, при відокремленні впливу інвертора на електродвигун. На рисунку 3.4 зображено трифазний регульований трансформатор, що перетворює напругу з 480 В на 120 В, ряд ламп синхронізації, і перемикач синхронізації, що з'єднує електродвигун Toyota Prius з електромережею 60 Гц.

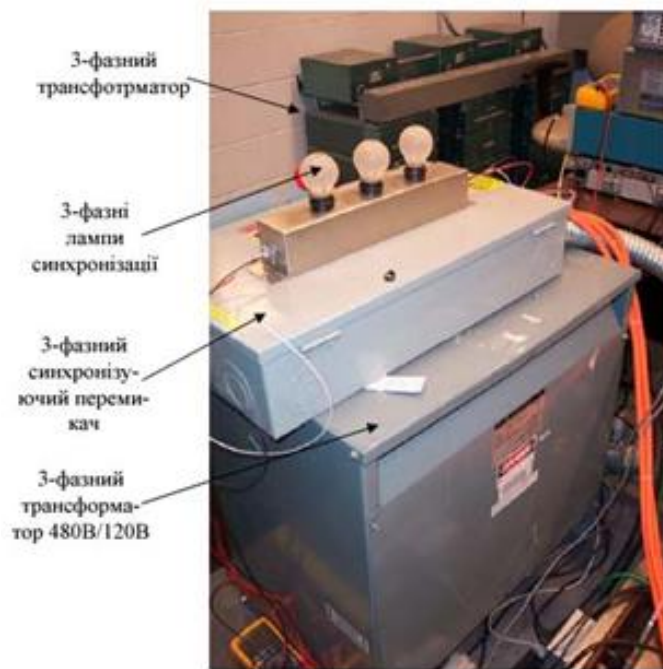


Рисунок 3.4 – Система електроживлення частотою 60 Гц для випробування електродвигуна на перегрівання

Вікно безпеки відокремлює приміщення перевірки й приміщення керування. Контрольно-вимірювальний пристрій даних з'єднаний із пристроєм одержання й реєстрації даних для того, щоб фіксувати струм, напругу, температуру, електрорушійну силу (ЕРС), витрату електричної енергії, крутний момент і час. Ватметр забезпечує вимірювання електричних даних, регулятор крутного моменту встановлює навантаження для підтримання необхідної частоти, контрольно-вимірювальний пристрій навантажувального кута вказує електричний кут між напругою на затискачах і зворотною ЕРС, і регулювання напруги здійснюється трансформатором, що розташований в приміщенні керування.

3.4 Теплові дослідження гібридної силової установки

Проведемо дослідження механічних втрати при випробуванні гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius при різних температурах охолоджувальної рідини. Електродвигун системи гібридного приводу обертає допоміжний двигун з частотою 900 об/хв в режимі марного ходу. При цьому були визначені механічні втрати при чотирьох температурах охолоджуючої рідини: 35 °С, 50 °С, 75 °С і 105 °С.

У таблиці 3.1 зведені підсумовує дані механічних втрат при різних температурах охолоджувальної рідини.

Таблиця 4.1 – Результати механічних втрат

Температура охолоджувальної рідини на вході, °С	Частота обертання ротора, об/хв	Частота обертання ротора, рад/с	Крутний момент, Н·м	Механічні втрати, Вт
35	900	94,25	1,7	160,2
50	900	94,25	1,7	160,2
75	900	94,25	1,7	160,2
105	900	94,25	1,6	150,8

Електродвигун гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius був перевірений при частоті обертання ротора 900 об/хв, температурі охолоджуючої рідини 35 °С і напрузі на вході від 80 В до 210 В. Дані випробування при марному режимі роботи зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані, отримані під час випробувань без навантаження

Напруга живлення, В	Крутний момент, Н·м	Частота обертання ротора, об/хв	Частота обертання ротора, рад/с	Механічна потужність, Вт	Електрична потужність, Вт	Струм, А	Температура обмотки, °С	Температура оливи, °С
80	0	900	94,2	0	210	1,9	33,7	33,1
85	0	900	94,2	0	220	3,8	33,7	33,2
90	0	900	94,2	0	230	7,7	33,7	33,2
95	0	900	94,2	0	240	11	33,8	33,3
100	0	900	94,2	0	270	14,6	34	33,4
105	0	900	94,2	0	280	18,3	34,4	33,5
110	0	900	94,2	0	320	21,7	34,9	33,7
115	0	900	94,2	0	360	24,9	35,4	33,9

120	0	900	94,2	0	400	27,5	36,1	34,1
125	0	900	94,2	0	440	30,1	37	34,5
130	0	900	94,2	0	480	31,4	37,9	34,9
135	0	900	94,2	0	500	34,3	39,1	35,2
140	0	900	94,2	0	530	37	40,5	35,7
145	0	900	94,2	0	580	39	41,7	36,1
150	0	900	94,2	0	640	41,6	43,2	36,7
155	0	900	94,2	0	700	44,8	44,7	37,2
160	0	900	94,2	0	780	48,7	46,3	37,8
165	0	900	94,2	0	870	52,5	48,3	38,5
170	0	900	94,2	0	930	54,5	50,5	39,5
175	0	900	94,2	0	1,170	63,3	54,5	40,7
180	0	900	94,2	0	1,310	67,3	59,1	42,3
185	0	900	94,2	0	1,670	77,5	65,1	44,6
190	0	900	94,2	0	1,900	82,4	79,5	50
195	0	900	94,2	0	2,250	89,8	85,7	53,1
200	0	900	94,2	0	2,960	103,8	100,7	59,4
205	0	900	94,2	0	4,040	119,6	119,5	65,8

Рисунки 3.5 і 3.6 показують залежність струму і потужності, відповідно, від напруги в режимі марного ходу.

Механічні й електричні втрати без використання навантаження використовуються, щоб встановити місця розташування втрат, для кращого аналізу температурних змін.

Перевірки були виконані, щоб визначити оптимальну напругу, яку необхідно підводити при даному крутному моменті до електродвигуна, якого пускають без навантаження. Крутний момент збільшували з кроком 10 Н·м, а напругу – 5 В. Оптимальна напруга була визначена при найвищому ККД.

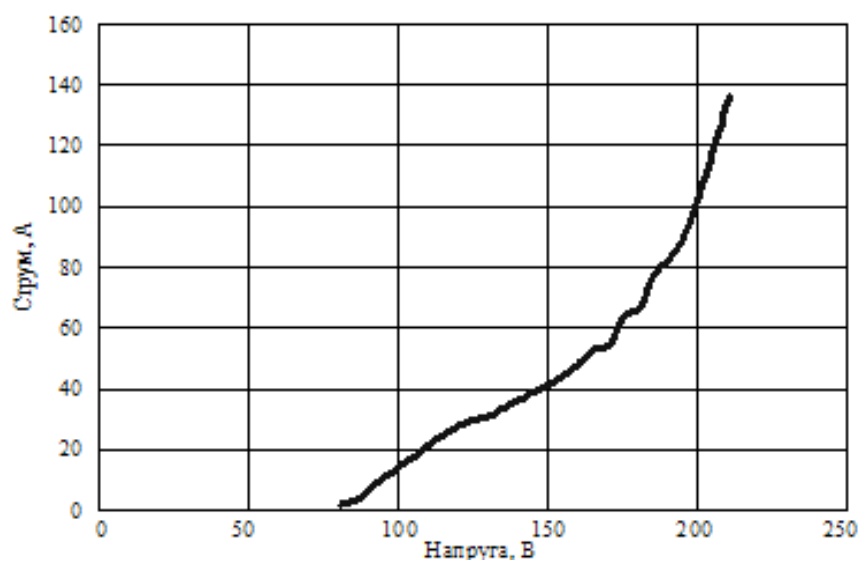


Рисунок 3.5 – Залежність струму від напруги при 900 об/хв.
в марному режимі

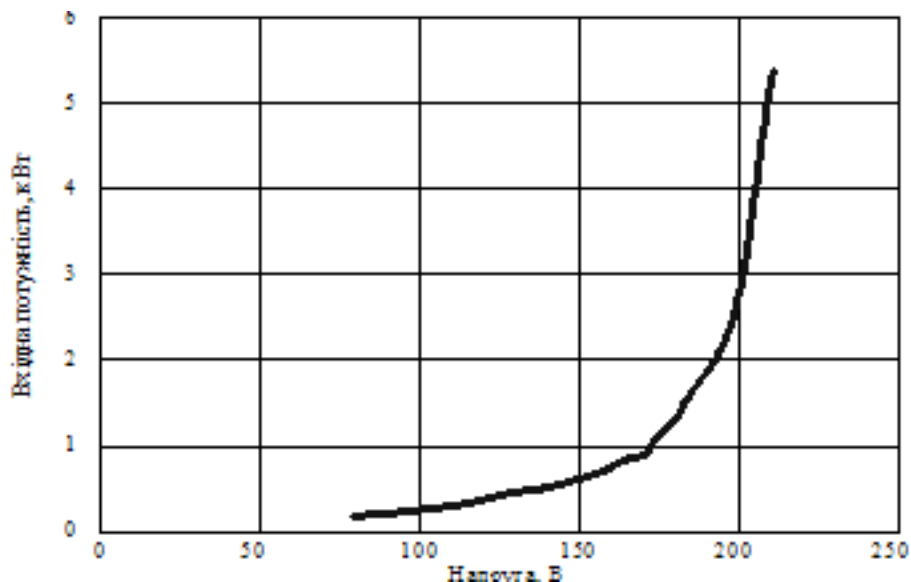


Рисунок 3.6 – Залежність потужності від напруги при 900 об/хв
в марному режимі

Випробування було виконано при кожній із чотирьох температур охолоджуючої рідини. Температура обмоток не перевищувала 170 °С, а оливи в системі змащення 158 °С, протягом випробувань. Таблиці 3.3, 3.4, і 3.5 підсумовують роботу електродвигуна при 35 °С, 50 °С, 75 °С.

Таблиця 3.3 – Результати при температурі охолоджувальної рідини 35 °С

Напруга живлення, В	Крутний момент, Н·м	Частота обертання ротора, об/хв	Частота обертання ротора, рад/с.	Механічна потужність Вт	Електрична потужність, Вт	ККД	Струм, А	Коефіцієнт потужності	Температура обмотки, °С	Температура оливи, °С
85	10	900	94,25	942	1,030	0,92	7,3	0,96	35,3	34,1
90	20	900	94,25	1,885	2,030	0,93	13,3	0,98	37	35,1
100	30	900	94,25	2,827	3,000	0,94	18,8	0,92	39,5	36,9
105	40	900	94,25	3,770	4,020	0,94	23,9	0,93	41,7	38
115	50	900	94,25	4,712	5,030	0,94	28,5	0,89	45,9	41,6
120	60	900	94,25	5,655	6,070	0,93	33	0,89	48,7	43,1
130	70	900	94,25	6,597	7,070	0,93	37,3	0,84	56,2	49,7
130	80	900	94,25	7,540	8,090	0,93	41,6	0,86	61,2	52,5
135	90	900	94,25	8,482	9,130	0,93	45,7	0,86	68,0	58
140	100	900	94,25	9,425	10,190	0,92	50,1	0,84	73,9	60,8

150	110	900	94,25	10,367	11,260	0,92	54,5	0,80	83,2	68,2
150	120	900	94,25	11,310	12,310	0,92	58,7	0,81	92,7	75,1
150	130	900	94,25	12,252	13,440	0,91	63,2	0,82	101,8	80,4
155	140	900	94,25	13,195	14,560	0,91	67,6	0,80	109,7	84,4
160	150	900	94,25	14,137	15,710	0,90	72,3	0,79	120,8	91,2
165	160	900	94,25	15,080	16,910	0,89	77,1	0,77	136,8	101,2
165	170	900	94,25	16,022	18,180	0,88	82,4	0,77	159,2	115,5

Таблиця 3.4 – Результати при температурі охолоджувальної рідини 50 °С

Напруга живлення, В	Крутний момент, Н·м	Частота обертання ротора, об/хв	Частота обертання ротора, рад/с	Механічна потужність, Вт	Електрична потужність, Вт	ККД	Струм, А	Коефіцієнт потужності	Температура обмотки, °С	Температура оливи, °С
80	0	900	94,25	0	140		1,5		51	50,5
85	10	900	94,25	942	1,090	0,86	7,8	0,95	51,8	51,2
90	20	900	94,25	1,885	2,060	0,92	13,9	0,95	54,2	53
100	30	900	94,25	2,827	3,070	0,92	19,4	0,91	57,2	55,3
105	40	900	94,25	3,770	4,070	0,93	24,3	0,92	60,7	57,7
115	50	900	94,25	4,712	5,070	0,93	29,0	0,88	64,8	60,3
120	60	900	94,25	5,655	6,090	0,93	33,4	0,88	68,6	62,5
130	70	900	94,25	6,597	7,110	0,93	37,5	0,84	71,1	63
130	80	900	94,25	7,540	8,140	0,93	42,3	0,86	79,4	69,8
135	90	900	94,25	8,482	9,190	0,92	46,4	0,85	85,5	73,7
140	100	900	94,25	9,425	10,220	0,92	50,6	0,83	90,2	75,4
140	100	900	94,25	9,425	10,220	0,92	50,6	0,83	90,2	75,4
150	110	900	94,25	10,367	11,310	0,92	55,1	0,79	104	86,3
150	120	900	94,25	11,310	12,400	0,91	59,3	0,81	111,7	90,4
150	130	900	94,25	12,252	13,500	0,91	63,8	0,82	119,9	94,5
155	140	900	94,25	13,195	14,720	0,90	68,1	0,81	135	103,6
160	150	900	94,25	14,137	15,800	0,89	72,9	0,78	144,1	107,7
165	160	900	94,25	15,080	17,040	0,88	78,0	0,77	160,7	120,3

Таблиця 3.5 – Результати при температурі охолоджувальної рідини 75 °С

Напруга живлення, В	Крутний момент, Н·м	Частота обертання ротора, об/хв	Частота обертання ротора, рад/с	Механічна потужність, Вт	Електрична потужність, Вт	ККД	Струм, А	Коефіцієнт потужності	Температура обмотки, °С	Температура оливи, °С
85	0	900	94,25	0	130		1,2		59,8	57,3
85	10	900	94,25	942	1,060	0,89	7,9	0,91	66	63,2
90	20	900	94,25	1,885	2,050	0,92	14	0,94	68,5	65,3
100	30	900	94,25	2,827	3,040	0,93	19,4	0,91	71,8	67,7
105	40	900	94,25	3,770	4,040	0,93	24,5	0,91	76	70,8
115	50	900	94,25	4,712	5,050	0,93	29	0,88	79,9	73,3
120	60	900	94,25	5,655	6,060	0,93	33,6	0,87	84,7	76,4
130	70	900	94,25	6,597	7,090	0,93	37,9	0,83	89,6	79,3
130	80	900	94,25	7,540	8,130	0,93	42,5	0,85	96,3	84,1
135	90	900	94,25	8,482	9,180	0,92	46,5	0,85	103,60	89
140	100	900	94,25	9,425	10,230	0,92	50,8	0,83	110,6	93,4

150	110	900	94,25	10,367	11,330	0,92	55,5	0,79	118,8	97,8
150	120	900	94,25	11,310	12,430	0,91	60	0,80	131,9	106,6
150	130	900	94,25	12,252	13,560	0,90	64,5	0,81	140,7	111,6
155	140	900	94,25	13,195	14,770	0,89	69,1	0,80	145,9	114,1

Випробування були виконані, щоб вирішити, що можливість безперервної роботи електродвигуна, при чотирьох температурах охолоджуючої рідини на вході, забезпечується, оскільки теплові параметри електричної машини є нижчі ніж температура обмотки статора і оливи в системі змащення. Таблиця 3.6 підсумовує параметри електродвигуна.

Таблиця 3.6 – Оцінки безперервного потоку потужності

Температура охолоджувальної рідини, °C	Крутний момент, Н·м	Значення потужності при 900 об/хв, Вт	Значення потужності при 1200 об/хв, Вт
35	167,3	16	21
50	159,6	15	20
74	145,7	14	18
103	117,8	11	15

Точка входу охолоджуючої рідини розміщена із сторони генератора і точка виходу – із сторони електродвигуна. Із генератора до тягового електродвигуна охолоджуюча рідина протікає через шланги. Результати оцінки безперервної роботи електродвигуна при частоті обертання ротора 900 об/хв і чотирьох різних температурах охолоджувальної рідини можуть бути обчислені для частоти 1200 об/хв при використанні даних крутного моменту і швидкості.

Відповідні розрахунки потужності при 1200 об/хв розроблені при апроксимації даних досліджень при 900 об/хв і використанні множника відношення швидкостей (тобто $1200/900=1,333$). Таблиця 3.7 показує можливі потужності при частоті ротора 900 об/хв, включаючи теплові дані та втрати потужності при різних температурах охолоджуючої рідини.

Таблиця 3.7 – Результати сумарних втрат

Температура охолоджувальної рідини, ° С	Напруга живлення, В	Крутний момент, Н·м	Механічна потужність, Вт	Електрична потужність, Вт	Сумарні втрати, Вт	Механічні втрати, Вт	Втрати в обмотках, Вт	Основні втрати, Вт	ККД	Струм навантаження, А	Коефіцієнт потужності
35	160	167,3	15,768	17,970	2,202	160	1,019	1,023	0,88	81,6	0,80
50	165	159,6	15,042	17,090	2,048	160	935	952	0,88	78	0,77
75	160	145,7	13,732	15,510	1,778	160	801	817	0,89	72	0,78
105	150	117,8	11,102	12,380	1,278	151	560	567	0,90	60,5	0,79

Рисунки 3.7 - 3.10 показують залежність температури в точках електродвигуна при частоті ротора 900 об/хв від часу випробувань для різних температур охолоджуючої рідини та крутних моментах відповідно.

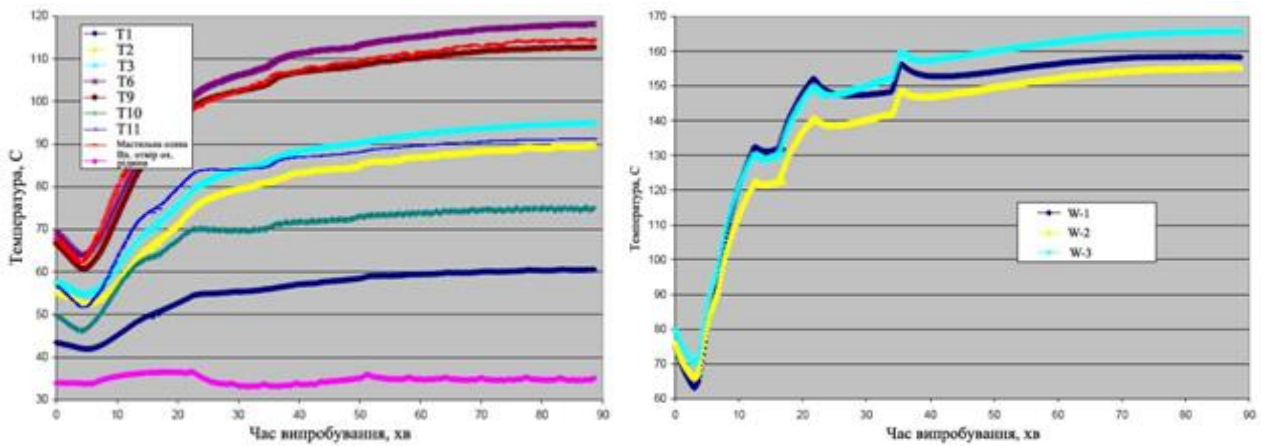


Рисунок 3.7 – Зміна температури при крутному моменті 168,7 Н·м і температурі охолоджувальної рідини 35 °С

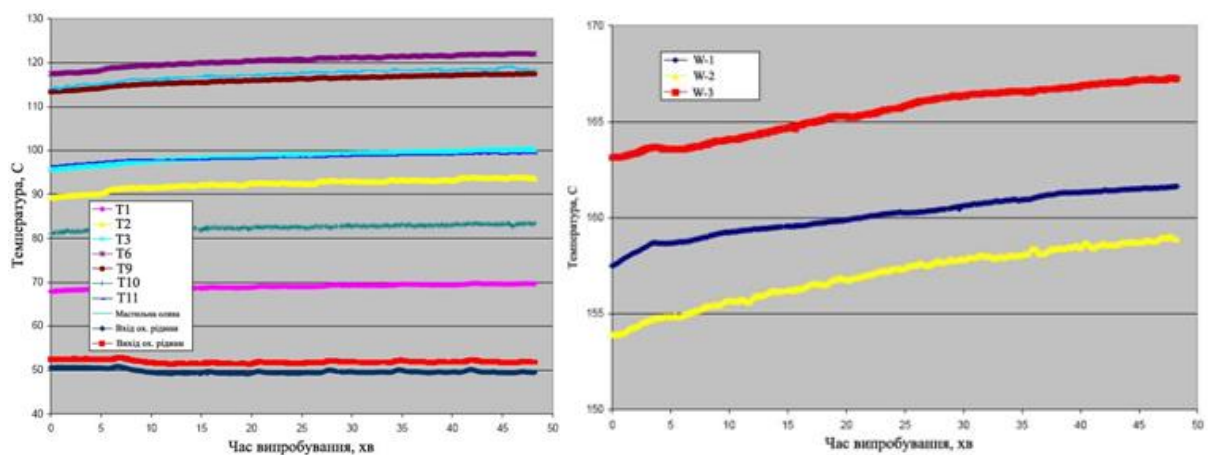


Рисунок 3.8 – Зміна температури при крутному моменті 159,6 Н·м і температурі охолоджувальної рідини 50 °С

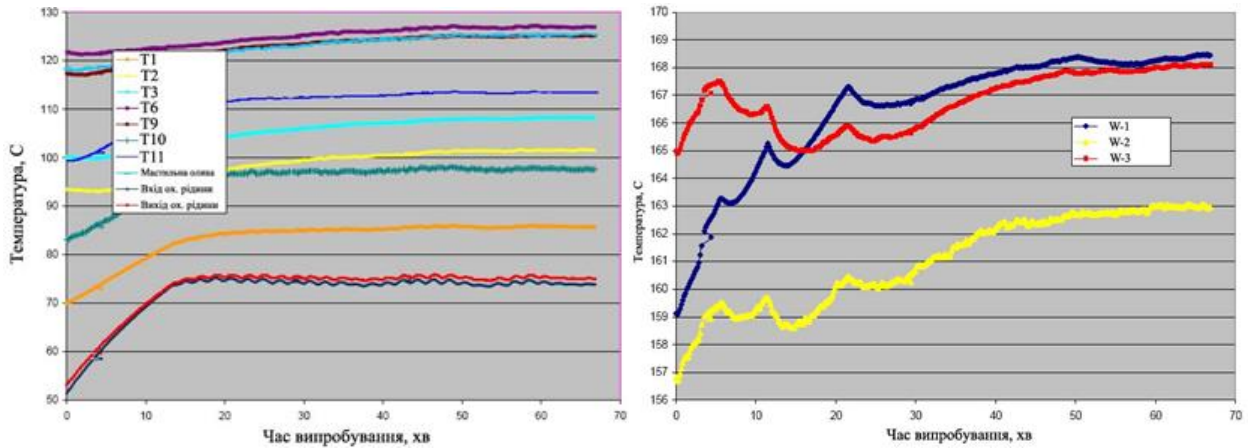


Рисунок 3.9 – Зміна температури при крутному моменті 145,7 Н·м і температурі охолоджувальної рідини 75 °С

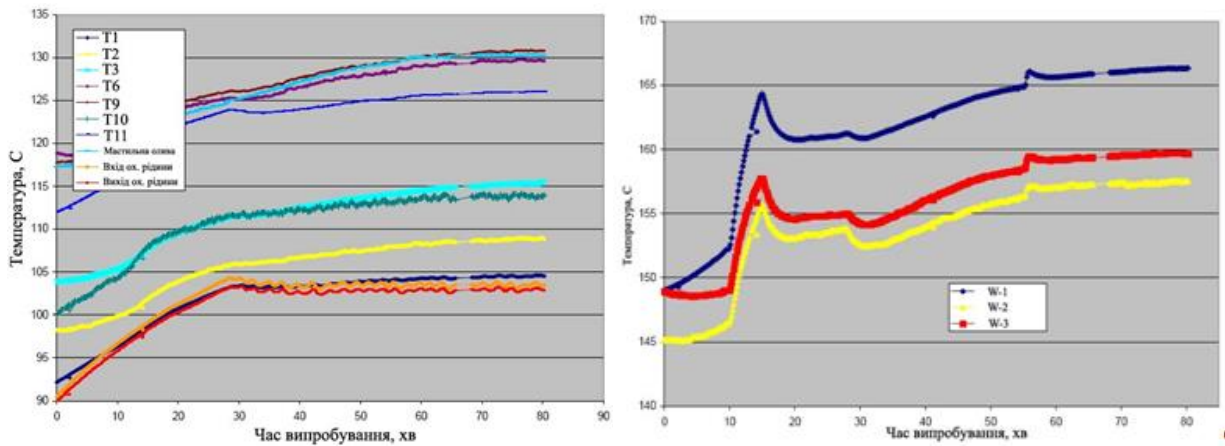


Рисунок 3.10 – Зміна температури при крутному моменті 117,8 Н·м і температурі охолоджувальної рідини 105 °С

Для безперервної роботи електродвигуна необхідно, щоб температура статора не перевищувала гранично допустимої (170 °С), а температура оливи в системі змащення не перевищувала 158 °С.

Таблиця 3.8 показує оцінку максимальної потужності за дослідними даними.

Таблиця 3.8 – Дослідження при максимальній потужності

Струм, А	Напруга, В	Крутний момент, Н·м	Механічна потужність, Вт	Час випробувань, с
136	205	265	24,976	91

149	205	300	28,275	40
161	205	320	30,160	62
176	205	335	31,574	30
187	205	344	32,422	30
176	210	338	31,857	40
136	205	265	24,976	91

Залежність температури від часу при різних крутних моментах і механічних навантаженнях зображено на рисунку 3.11.

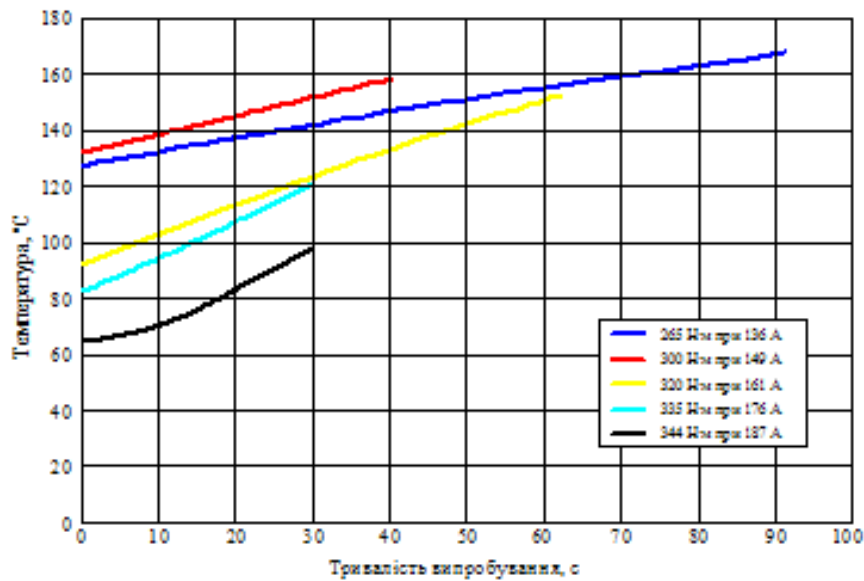


Рисунок 3.11 – Випробування максимальної потужності при частоті ротора 900 об/хв і напрузі 205 В

Рисунок 3.12 показує залежність швидкості зміни температури від крутного моменту.



Рисунок 3.12. Швидкість зміни температури обмотки
при крутному моменті 400 Н·м

Спроекована точка – це точка із координатами 400 Н·м і 2,1 °С/с. Якщо температура електродвигуна 40 °С, то для досягнення критичної температури необхідно 62 с ((розрахунок часу 170-40)/2,1). Якщо обмотка електродвигуна гаряча і її температура 160 °С, то для виконання тієї ж операції необхідно 4,8 с при максимальному навантаженні ((розрахунок часу 170-160)/2,1).

ККД і коефіцієнти потужності електродвигуна при максимальному крутному моменті наведено в таблиці 3.9. ККД може бути в межах від 40 % до 50 %, коли навантаження крутного моменту зростає. Коефіцієнт потужності майже еквівалентний активному навантаженню через високі втрати.

Таблиця 3.9 – ККД і потужності в області максимального моменту

Температура обмотки, °С	Крутний момент, Н·м	Струм, А	Напруга, В	Механічна потужність, Вт	Електрична потужність, Вт	ККД
127,8	265,0	136,0	205,0	24976	48232	0,518
132,4	300,0	149,0	205,0	28275	52843	0,535
92,9	320,0	161,0	205,0	30160	57099	0,528
82,9	335,0	176,0	205,0	31574	62418	0,506
70,8	344,0	187,0	205,0	32422	66320	0,489

3.5 Результати випробувань

Дослідження теплових характеристик гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius були досягнуті через оцінку системи, підготовку до випробувань і лабораторні дослідження, які включали вимірювання теплових втрат, визначення втрат потужності, визначення зміни температури в різних точках системи. В основному, повний підхід цього проекту полягав у тому, щоб повністю визначити системи й потім виконати детальну оцінку їхніх робочих характеристик у лабораторному середовищі, яким керують. Цей підхід, як виявилось, був технічно грамотним й успішним. Проведено випробування робочих характеристик при визначенні зміни температури в певних точках

системи в залежності від температури охолоджувальної рідини і часу випробування.

Випробування гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius показало, що зв'язані з коробкою передач втрати тертя, є суттєвими. Ці втрати складають приблизно 2,4 кВт при швидкості обертання ротора електродвигуна 6000 об/хв. Переважні втрати, приблизно 1,6 кВт, пов'язані з головною передачею й ланцюгом двигуна, у той час як електродвигун, коробка розподілу потужності, і генератор привели до втрат приблизно рівних 0,8 кВт. Втрати зубчастої передачі насамперед пов'язані з оливою, що рухається в межах кожуха двигуна, й оливою, що рухається через генератор і електродвигун, щоб забезпечити необхідне змащування й видалення зайвої високої температури. Ці втрати, які наведені в підсумку в таблиці 3.10, були визначені з мастильними матеріалами при кімнатній температурі (при 25 °C).

Випробування також показали, що повні втрати зменшилися приблизно на 20 %, коли температура мастильних матеріалів збільшилася з 27 °C до 80 °C. Це зауваження вказує, що повні втрати для гібридної системи електроприводу рівні приблизно 1,9 кВт при температурі мастильних матеріалів 80 °C.

Таблиця 3.10 – Сумарні втрати в зубчастій передачі при 25 °C

Елемент	Втрати, %
Головна і ланцюгова передачі	68
Ротор електродвигуна	21
Генератор і планетарна передача	11

Передаточні числа передачі були змінені й записані для ротора електродвигуна й для ротора генератора. Ці зміни були насамперед виконані, щоб забезпечити точне обчислення швидкості, крутного моменту, і навантаження, але отримані дані також дали корисну інформацію для порівняння з іншими двигунами й можливість забезпечення технічного вибору і компромісу, які були втілені в частині цієї роботи.

Проведено вимірювання частоти струму і зворотної напруги на електродвигуні і генераторі. Протягом випробувань використовувався динамометр, щоб керувати швидкістю обертання роторів двигуна і генератора.

Серія випробувань блокованого ротора електродвигуна була виконана, щоб визначити загальні операційні властивості його тягової здатності. Зокрема крутний момент і струм, вивчені протягом випробувань блокованого ротора, дали можливість охарактеризувати здатність крутного моменту при пуску електродвигуна. Струм і відповідне значення крутного моменту представлені таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати випробувань струму і відповідного йому крутного моменту

Струм, А	Максимальний крутний момент, Н·м
75	140
150	260
250	400

Дослідження ефективності гібридної силової установки супроводжувалося тепловим випробуванням. Ці випробування були успішними у визначенні безперервних оцінок електродвигуна при температурах охолоджуючої рідини в межах від 35 °С до 105 °С. Ця інформація не була випущена компанією по виробництву автомобілів Toyota Prius. Оцінки на основній швидкості (1200 об/хв) були спроектовані від випробувальних даних при 900 об/хв. Безперервні дослідження були налаштовані для використання 15 кВт при температурі 105 °С охолоджуючої рідини, і використання 21 кВт при температурі 35 °С охолоджуючої рідини.

Таким чином, результати випробування гібридної силової установки Hybrid Synergy Drive автомобіля Toyota Prius забезпечили великою кількістю інформації щодо цих інноваційних, високопродуктивних підсистем, які не були доступні раніше.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гібридні автомобілі / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А. та ін.]. – Х.: ХНАДУ, 2008. – 327 с. Посилання на електронну версію: <http://files.khadi.kharkov.ua/mekhatroniki-transportnikh-zasobiv/avtomobilnoji-elektroniki/item/6155-gibridnye-avtomobili-monografiya.html>.
2. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика / [Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Двадненко В.Я.]. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с. Посилання на електронну версію: <http://files.khadi.kharkov.ua/mekhatroniki-transportnikh-zasobiv/avtomobilnoji-elektroniki/item/6156-synerhetychnyi-avtomobil-teoriia-i-praktyka.html>
3. ДСТУ UN / ECE R 83-05: 2009. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження колісних транспортних засобів стосовно викидів забруднювальних речовин залежних від палива, необхідного для двигунів (Правила ЄЕК ООН № 83-05:2005, IDT).
4. Prius-Plug-In-Hybrid [електронний ресурс] / Електронні дані. - Режим доступу: <http://www.toyota.com/prius-plug-in-hybrid/>. - Назва з екрану.
5. Смирнов О.П. Обоснование использования вентиляльных электрических машин в гибридных силовых установках автомобилей / О.П. Смирнов, В.И. Калмыков // Автомобильный транспорт. – 2007. – № 21. – С. 31–33.
6. Смирнов О.П. Исследование функциональных возможностей вентиляльных машин в электроприводе автомобилей. / О.П. Смирнов, В.И. Калмыков, В.С. Боженков, А.М. Быков, Д.А. Воробьев. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту «ДонНТУ». – 2007. – № 1(4). – С. 129–132.
7. J.S. Hsu, S.C. Nelson, P.A. Jallouk et al., Report on Toyota Prius Motor Thermal Management, ORNL/TM-2005/33, UT-Battelle, LLC, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, February 2005.
8. J.S. Hsu, C.W. Ayers, C.L. Coomer, R.H. Wiles, S.L. Campbell, K.T. Lowe, and R.T. Michelhaugh, Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property,

- No-Load Back-EMF, and Mechanical Losses, ORNL/TM-2004/185, UT-Battelle, LLC, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, October 2004.
9. Prius Repair Manual, 1, Pub. No. RM1075U1, Toyota Motor Corporation, 2003.
 10. Prius Repair Manual, 2, Pub. No. RM1075U2, Toyota Motor Corporation, 2003.
 11. Prius Repair Manual, 3, Pub. No. RM1075U3, Toyota Motor Corporation, 2003.
 12. J.S. Hsu, C.W. Ayers, and C.L. Coomer, Report on Toyota/Prius Motor Design and Manufacturing Assessment, ORNL/TM-2004/137, UT-Battelle, LLC, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, August 2004.
 13. Prius New Car Features 2004, Toyota Motor Corporation, 2004.
 14. N. Bianchi, S. Bolognani, and B.J. Chalmers, "Salient-Rotor PM Synchronous Motors for an Extended Flux-Weakening Operation Range," IEEE Transactions on Industry Applications, 36(4), July/August 2000.
 15. S.D. Rubira and M.D. McCulloch, "Control Method Comparison of Doubly Fed Wind Generators Connected to the Grid by Asymmetric Transmission Lines," IEEE Transactions on Industry Applications, 36(4), July/August 2000.
 16. F.Z. Peng, Z-Source Inverter for Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles, Michigan State University, March 2004.
 17. J.S. Hsu, Ph.D., C.W. Ayers, C.L. Coomer, R. H. Wiles, Oak Ridge National Laboratory. Report on Toyota Prius motor torque capability, torque property, no-load back EMF, and mechanical losses.
 18. Laura D. Marlino, Program Manager Prepared by: Oak Ridge National Laboratory. Report on Toyota Prius motor thermal management.
 19. J.S. Hsu, C.W. Ayers, C.L. Coomer Oak Ridge National Laboratory . Report on Toyota Prius motor design and manufacturing assessment