

УДК 629.113/623.4

О. П. Кондратенко

## ОБОРОТНА АСИНХРОННА МАШИНА В ГІБРИДНІЙ ТЕХНІЦІ. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ

*Представлені результати аналізу характеристик та особливостей застосування асинхронної машини в генераторному режимі для гібридної силової установки транспортного засобу.*

*К л ю ч о в і с л о в а: асинхронна машина, генераторний режим, гібридна силова установка.*

**Постановка проблеми.** У зв'язку з погіршенням екологічної обстановки у світі та обмеженістю сировинних ресурсів актуальною проблемою сучасного машинобудування є створення економічних і екологічно чистих машин. Сучасний автомобіль – транспортний засіб новітнього покоління, створений шляхом поєднання механічної основи традиційного автомобіля з електротехнічними та електронними пристроями. Останнім часом споживання електроенергії автомобілем збільшується, як і використання у ньому нових електричних і електронних систем. Так, модель BMW 7-ої серії має більше 60 процесорів і близько 80 всіяких електродвигунів [1], які потребують великої кількості електроенергії. Цей набір споживачів з кожним роком розширюється.

Сьогодні практично всі провідні автовиробники мають у своєму модельному ряді автомобілі, обладнані системою “старт-стоп”. За прогнозами експертів, до 2015 року половина легкових автомобілів, що випускаються, буде обладнана такою системою. Ця система призначена для економії пального, зниження шкідливих викидів і шуму двигуна за рахунок скорочення часу роботи на холостому ходу. Як показує практика експлуатації автомобіля, режим холостого ходу складає до 30 % загального часу роботи двигуна через часті зупинки на світлофорах та знаходження в пробках великого міста [2]. Донедавна система “старт-стоп” застосовувалася, в основному, на гібридних автомобілях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розроблення й використання гібридних силових установок (ГСУ), що включають у себе двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) і електродвигун, є одним з основних напрямків робіт з досягнення бажаних результатів [3]. За даними виробників подібних приводів, використання ГСУ знижує витрати пального на 10...25 %, а шкідливі викиди – на 40...50 %. Це досягається за рахунок зменшення робочого об'єму ДВЗ, рекуперації енергії транспортного засобу, зниження частки перехідних режимів роботи [4]. В останні роки увагу конструкторів привернув той факт, що для генерування енергії в стартер-генераторних установках (СГУ) стали частіше застосовувати асинхронні машини [5].

**Метою статті** є визначення шляхів зниження витрати пального й шкідливих викидів ГСУ на основі переважного, де це можливо, використання електромашини асинхронного типу. Обговорюється новий підхід до проектування схеми й параметрів приводу з ГСУ, що відкриває можливість зниження втрат енергії й зменшення шкідливих викидів ДВЗ при мінімальній складності системи керування. Спрощення системи керування досягається за рахунок зменшення числа одночасно керованих параметрів ДВЗ і електродвигуна, завдяки відсутності між ними твердого кінематичного зв'язку.

**Виклад основного матеріалу.** Вітчизняна автомобільна промисловість автотранспортні засоби з ГСУ практично не розробляє. Дослідні роботи, що проводилися до останнього часу у наукових підрозділах вузів і галузевих НДІ, у зв'язку з незатребуваністю їх результатів автозаводами фактично припинені.

На сьогодні в експлуатації перебувають багатоцільові автомобілі, наприклад, УАЗ. Він з однаковим успіхом використовується як у цивільних установах, так і в Збройних Силах, МВС, інших силових структурах. Тому можливість створення зразків автотранспортних засобів із ГСУ, виконаних на основі елементів конструкції багатоцільових автомобілів, є перспективною.

Такий автомобіль може стати зразком автотранспортних засобів подвійного призначення. Для силових відомств він буде цікавий можливістю багатоцільового застосування і низкою специфічних властивостей (підвищені тягово-динамічні властивості за рахунок поєднання потужності ДВЗ і електричних накопичувачів, здатність у певних умовах виконувати поставлені завдання з непрацюючим ДВЗ). Для цивільних споживачів – як вантажопасажирський і міський розвізний

автомобіль, оскільки значну частину шляху в місті він здатний подолати з непрацюючим ДВЗ. Крім того, у ньому достатньо просто вирішити актуальну для міського циклу задачу рекуперації енергії гальмування та забезпечити можливість під'їзду до зупинки (стоянки), а також рушання з місця після зупинки з непрацюючим ДВЗ.

У технічній літературі напрацювання для подібних автомобілів представлені, зокрема, МДТУ імені М. Е. Баумана. У практичному плані багато в даному напрямку зроблено в МДМУ "МАМІ" [6]. На основі аналізу стану питання, яке розглядається, далі в статті як базовий прийнятий повнопривідний автомобіль, що дозволяє у варіанті із ГСУ сконструювати автомобіль подвійного призначення.

Вибір такого варіанта зроблено на основі розрахункових досліджень паливної економічності автомобіля, оснащеного ГСУ, виконаної за різними (послідовна, паралельна, змішана) схемами (табл.).

Т а б л и ц я

| Показник   | Схема ГСУ  |            |         | Базовий автомобіль |
|--|------------|------------|---------|--------------------|
|  | послідовна | паралельна | змішана |                    |
| Шляхова витрата палива в міському циклі, л /100 км | 9,2        | 8,4        | 8,2     | 17,4               |

Як видно з таблиці, найвигідніший варіант з погляду на паливну економічність є ГСУ, виконана за змішаною схемою. Для визначеності далі вибираємо паралельну схему, оскільки, по-перше, промисловість випускає всі необхідні для її реалізації автомобільні агрегати й вузли; по-друге, вона забезпечує автомобілю паливну економічність, яка практично не відрізняється від тієї, що може дати змішана схема; по-третє, її виконання простіше, ніж останньої.

Варіант компоновальної схеми автомобіля, обладнаного вибраною ГСУ, наведено на рис. 1. До неї входять елементи не тільки серійного автомобіля: ДВЗ, коробка передач, приводи переднього й заднього мостів, а й нові для автомобіля пристрої: оборотна електрична машина зі своїм приводом (мотор-генератор), накопичувачі енергії й система керування тяговим електроустаткуванням.

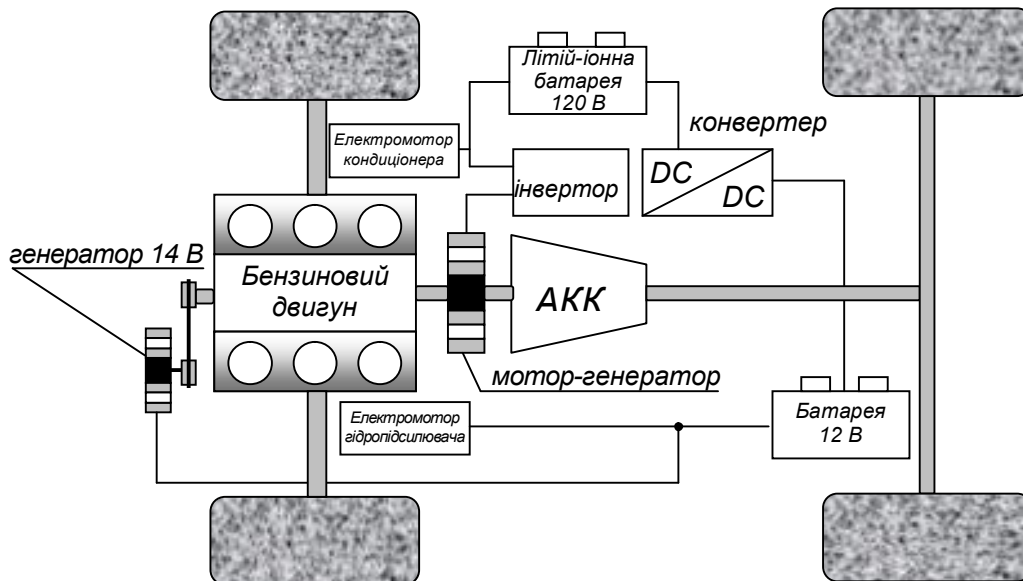


Рис. 1. Приклад структури гібридної силової установки Mercedes S-400 Blue Hybrid

Передавання потужності в цьому випадку здійснюється без використання проміжних агрегатів, що підвищує ККД трансмісії автомобіля. Не потрібний також і міжосьовий диференціал. Можливість руху з повним приводом забезпечується при виключеному ДВЗ, тобто при мінімальних теплових і звукових випромінюваннях, що важливо у військовій справі. Для об'єднання крутних моментів потрібно використовувати принципово іншу роздавальну коробку: з одного боку до неї підводиться крутний момент від ДВЗ, а з іншого – від оборотної електричної машини, здатної працювати як у режимі тягового електродвигуна, так і в режимі генератора (під час гальмування автомобіля).

Визначальним положенням для системи "стартер-генератор ДВЗ" є тип застосовуваної електричної машини. Розробки СГУ провідних фірм будуються на базах таких електричних машин (розташовані за зменшенням кількості розробок):

- асинхронна машина з короткозамкненим ротором;
- синхронна машина з електромагнітним збудженням;
- вентиляльна машина з постійними магнітами;
- синхронна машина з постійними магнітами;
- вентиляльна індукторна машина із самозбудженням.

Розглянемо можливості генерування енергії за допомогою асинхронних машин.

У систему, що пропонується (рис. 2), входять: асинхронна оборотна електромашина, блок перетворення енергії й керування, блок силової комутації, блок керування режимами електромашини, блок акумуляторних батарей.

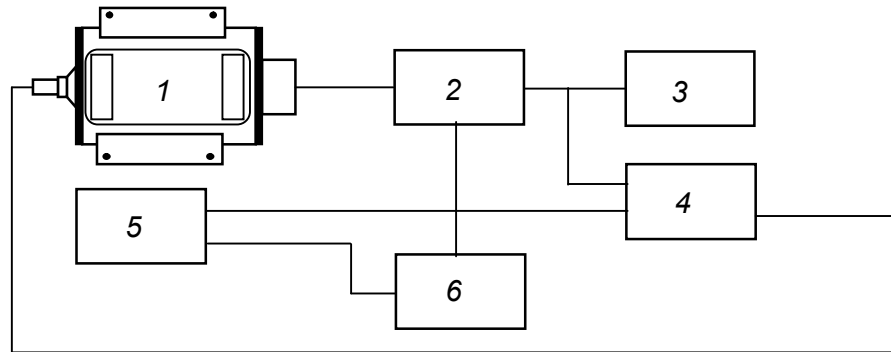


Рис. 2. Система тягового електроустаткування: 1 – асинхронна оборотна електромашина; 2 – розподільна панель; 3 – блок акумуляторних батарей; 4 – блок перетворення енергії й керування; 5 – блок керування режимами електромашини; 6 – блок силової комутації

Як відомо, для генераторів кількість полюсів визначає синхронну швидкість  $n_1$  електромашини як функцію частоти мережі  $f_1$ . Варіанти застосування:

- субсинхронна робота (ковзання  $s > 0$  – працює як двигун,  $n_N = 1480$  об/хв);
- надсинхронна робота ( $s < 0$  – працює як генератор,  $n_N = 1515$  об/хв).

У разі останнього варіанта застосування асинхронна машина перейде в генераторний режим, перетворюючи механічну енергію первинного двигуна в електричну. В автомобілі асинхронний генератор працює в автономних умовах, тобто без включення в загальну мережу. У цьому випадку для одержання реактивної потужності, необхідної для намагнічування генератора, використовується батарея конденсаторів, включених паралельно навантаженню на виводах генератора.

Зміною ємності конденсаторів можна змінювати величину струму, що намагнічує, тобто величину напруги генераторів. Через надмірну громіздкість і певну вартість конденсаторних батарей асинхронні генератори із самозбудженням дотепер широко не використовуються, але цілком придатні для електростанцій малої потужності, наприклад, в установках бортової мережі автомобіля. Фізичні процеси самозбудження асинхронного генератора ще недостатньо вивчені, що пов'язане з переважним використанням асинхронної машини як двигуна. Для роботи у генераторному режимі ці машини проектували й випускали достатньо рідко.

Варіант підключення трифазного електродвигуна як генератора можна вважати класичним, але не єдиним. Існують інші способи, які також добре зарекомендували себе на практиці. Наприклад, коли конденсатори підключаються до однієї або двох обмоток електродвигуна-генератора (рис. 3). Таку схему слід використовувати тоді, коли немає необхідності одержувати трифазну напругу.

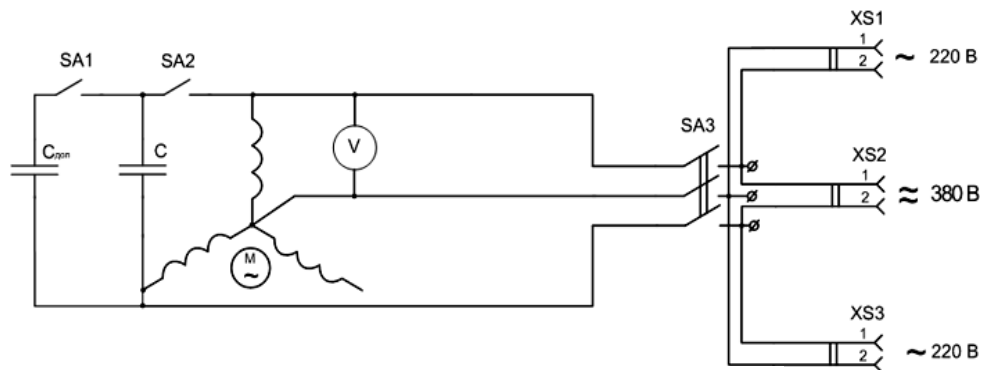


Рис. 3. Двофазний режим асинхронного генератора

Цей варіант включення зменшує робочу ємність конденсаторів й знижує навантаження на первинний механічний двигун у режимі холостого ходу.

У асинхронного генератора з фазним ротором (його ще називають генератором “подвійного живлення”) такий самий статор, як і у стандартного асинхронного генератора. Тут є можливість використати окреме живлення обмоток ротора й статора (суть “подвійного живлення”). Ротор не приєднаний безпосередньо до мережі, він живиться через інвертор (рис. 4). Отже, живлення ротора може бути керованим.

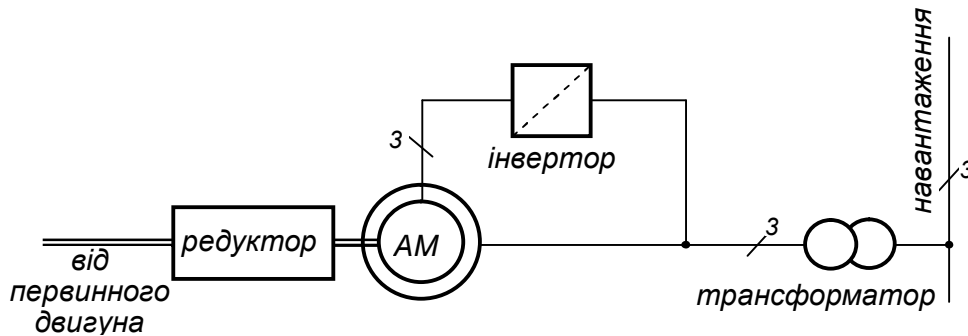


Рис. 4. Структурна схема асинхронного генератора з фазним ротором

Асинхронний генератор з фазним ротором поєднує в собі переваги синхронної й асинхронної машини: робота на різних швидкостях, роздільний контроль активної і реактивної потужностей. Він також має певні технічні переваги, порівняно зі стандартною асинхронною машиною. Однак при використанні системи необхідно враховувати більш високу вартість комплексу генератора й інвертора.

Таким чином, в автономному асинхронному генераторі (рис. 5) до виходу генератора АГ, що обертається від якого-небудь первинного двигуна Д, паралельно навантаженню в кожен фазу підключають конденсатор С [7].

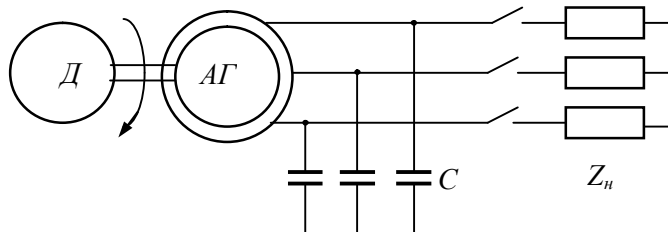


Рис. 5. Схема включення асинхронного генератора з конденсаторним збудженням

Можна підібрати ємність конденсатора таким чином, щоб номінальна напруга й потужність асинхронного генератора дорівнювали відповідно напрузі й потужності при його роботі в режимі електродвигуна. На рис. 6, 7 наведені розраховані значення ємності конденсаторів для збудження асинхронних генераторів 380 В, 750...1500 об/хв у вигляді графіків.

З наведених даних видно, що індуктивне навантаження на асинхронний генератор знижує коефіцієнт потужності й спричинює різке збільшення потрібної ємності. Зі збільшенням навантаження для підтримання сталого значення напруги необхідно збільшувати і ємність конденсаторів.

Потужність конденсаторів у схемі асинхронного генератора із самозбудженням близька до його номінальної активної потужності. Останнім часом для самозбудження асинхронних генераторів застосовують статичні джерела реактивної потужності з керованими напівпровідниковими вентилями (тиристорами). Асинхронні генератори з такими джерелами реактивної потужності наближаються за своєю ефективністю до синхронних генераторів. Саме цей варіант і розглянемо далі на прикладі стартерів-генераторів.

Стартер-генератор не входить до числа навісного устаткування двигуна, він вмонтований у нього. Саме цей пристрій являє собою асинхронну трифазну електромашину, статор якої встановлений у спеціально виділеній для нього ніші блока двигуна, а ротор безпосередньо прикріплений до колінчатого вала.

розрахунок ємності

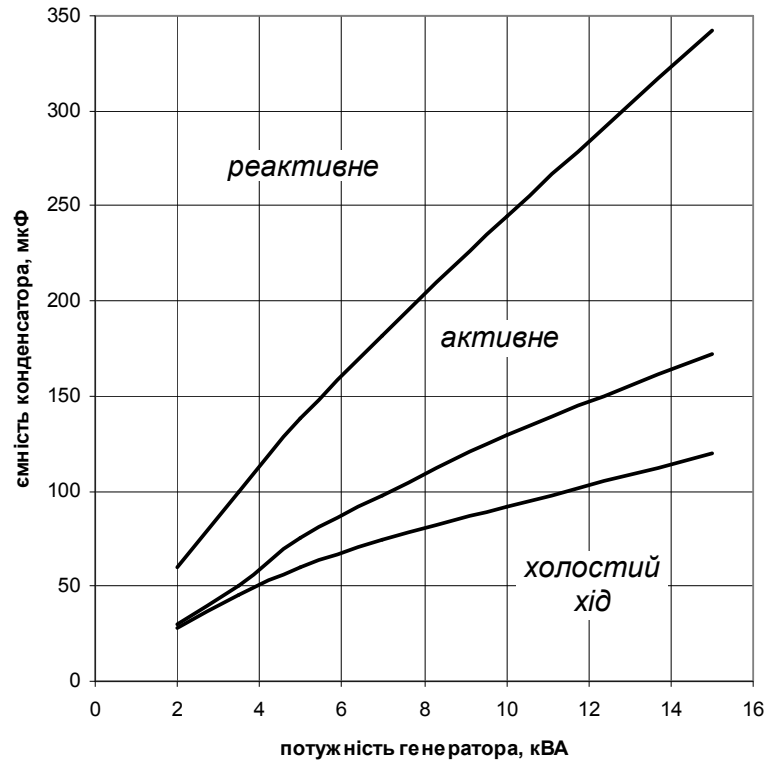


Рис. 6. До розрахунків ємності конденсатора

розрахунок реактивної потужності

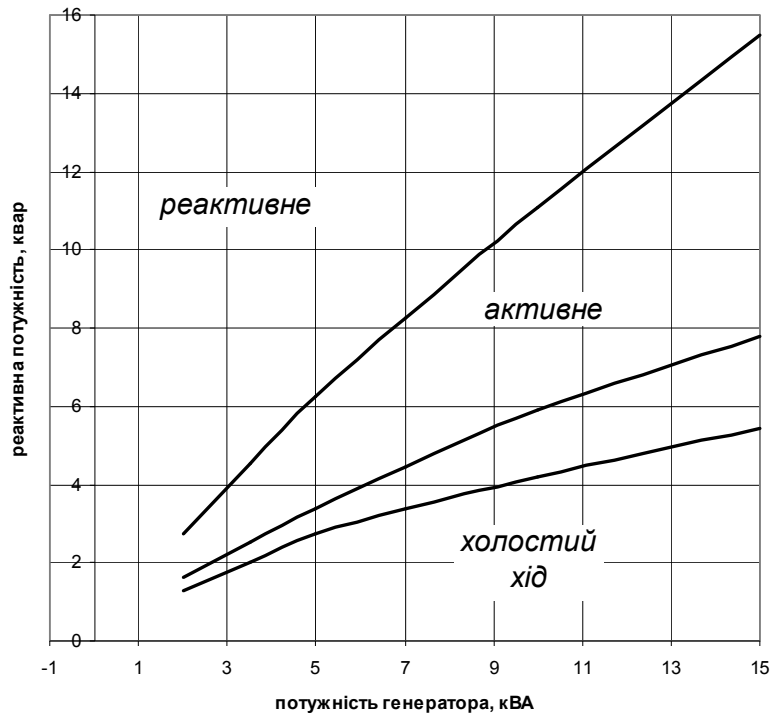


Рис. 7. До розрахунків необхідної реактивної потужності

При роботі в режимі стартера крутний момент досягає великих значень – 180...400 Н·м, а розкручування колінчатого вала до 600 об/хв відбувається практично безшумно, всього за 2,4 с. Завдяки цьому пуск двигуна відбувається за лічені частки секунди, чим забезпечується значне зниження кількості викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами.

У міському режимі руху можливість швидкого й екологічно нешкідливого старту дозволяє припиняти роботу двигуна на короткі проміжки часу, наприклад, у разі зупинки на червоне світло. До того ж економія палива у цьому випадку може складати до 10 %.

У режимі генератора також помітна його перевага. Він виробляє не тільки в три рази більше електроенергії, а й працює з набагато меншими її втратами. ККД звичайного генератора, залежно від частоти обертання його ротора, складає 30...70 %. Цей самий показник для сполученого пристрою практично не залежить від обертів і становить 75...80 %, що зменшує витрати потужності, отже, і палива.

Стартер-генератор не тільки надійно забезпечує автомобіль електроенергією. Нові технології дозволяють зберігати й надлишкову електроенергію, що виробляється генератором. Це досягається за допомогою суперконденсаторів, які можуть зберігати електроенергію й віддавати її у потрібний час. Такі накопичувачі енергії вже перебувають у стадії виробництва.

СГУ також може самостійно забезпечувати рух автомобіля на невеликих швидкостях (до 10...15 км/год), що дуже ефективно в пробках, тому що ДВЗ, механічно від'єднаний від СГУ, при цьому вимикається. У разі гальмування двигуном система переводить СГУ в режим генератора, і кінетична енергія руху автомобіля використовується для підзарядки акумуляторних батарей або суперконденсаторів, забезпечуючи режим рекуперації.

Розробки іноземних фірм відрізняються як за видами і призначенням алгоритмів роботи, так і за конструкцією й схемою приводу СГУ, а також за компонованням електромашини в трансмісії [8].

Найбільш часто застосовуваним компонованням є варіант, коли статор електричної машини жорстко закріплений на картері ДВЗ, а ротор є маховиком ДВЗ. У переважній більшості випадків СГУ монтується на одній осі із ДВЗ і коробкою передач (між ними) [8]. Схема такого розташування СГУ відносно ДВЗ і трансмісії показана на рис. 8.

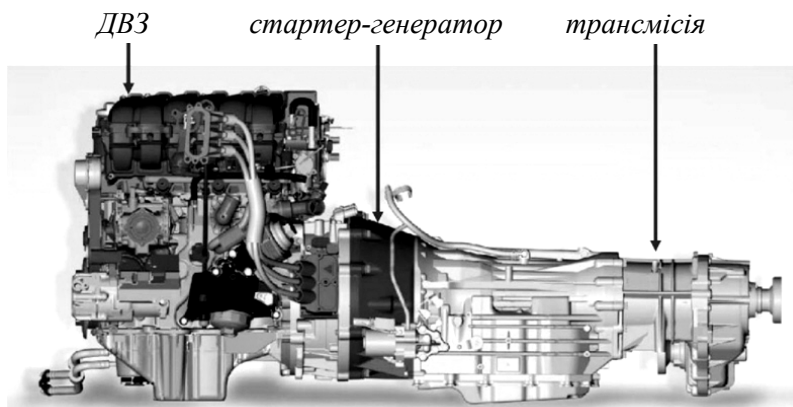


Рис. 8. Схема розміщення СГУ на одній осі з ДВЗ і коробкою передач

Такий варіант розміщення СГУ є оптимальним, оскільки дозволяє одержати високомоментну електричну машину без істотного втручання й доробки конструкції силового агрегата автомобіля (ДВЗ і коробки передач).

Існує також варіант розміщення СГУ як навісного агрегата, що обертається від ДВЗ за допомогою ремінної або зубчастої передачі, однак, такі конструкції створюють не часто. Британська компанія Integral Powertrain розробила СГУ нового покоління – компактний стартер-генератор постійного струму з водяним охолодженням, потужність якого 5 кВт, із ремінним приводом від колінчатого вала ДВЗ. Шків СГУ має двоступінчастий планетарний редуктор, який управляється електромагнітною муфтою. При запуску двигуна в редукторі включається понижуючий ступінь (3,1:1), що полегшує роботу електромотора. Після пуску привод стартера-генератора автоматично перемикається на пряму передачу.

Керування СГУ є достатньо складним процесом, воно зазвичай здійснюється за допомогою сигнального процесора, спеціалізованого на керуванні електродвигунами. Такі процесори випускають провідні електронні фірми (Texas Instrument, Analog Devices, Motorola, Siemens) [9]. Важливим елементом схеми є підсилювачі потужності (драйвери), призначені для узгодження за потужністю й напругою сигналів між системою керування й силовими ключами.

### **Висновки**

1. Створення зразків багатоцільових автотранспортних засобів з гібридною силовою установкою, виконаних на основі елементів конструкції сучасних автомобілів, є перспективним. Такий автомобіль може бути зразком автотранспортних засобів подвійного призначення.

2. Компонувальна схема гібридної силової установки дає можливість варіювати як типом використовуваної енергетичної установки (ДВЗ, електродвигун або їх комбінація), так і типом приводу (повний блокований, повний від різних джерел енергії, індивідуальний від різних джерел енергії на кожний міст).

3. Система тягового електроустаткування складається з асинхронної оборотної електромашини, блока перетворення енергії й керування, блока силової комутації, пульта керування, блока керування режимами електромашини, розподільної панелі, блока акумуляторних батарей.

4. Перевагою асинхронного електрогенератора є те, що в ньому повністю відсутні обертові обмотки й деталі, які чутливі до зовнішніх впливів і часто пошкоджуються. Отже, асинхронний генератор мало зношується й може працювати дуже довго.

5. На виходах активних асинхронних генераторів установлюють спеціальні конденсатори, що є джерелом реактивної потужності, необхідної для нормальної роботи.

6. Асинхронну машину з короткозамкненим ротором часто використовують у СГУ. Її переваги полягають у простоті конструкції, високій надійності й малій вартості. Однак її конструктивні недоліки є причиною втрат у роторі, що знижує ККД машини.

### **Список використаних джерел**

1. Шакарян, Ю. Г. Новое энергетическое оборудование XXI века [Электронный ресурс] / Ю. Г. Шакарян, А. В. Бобылев. – Режим доступа : <http://www.rao-ees.elektra.ru/ru/news/gazeta/151-2004/show.cgi?novo.htm>. – Загл. с экрана.

2. Хапов, Е. Гибридный конструктор BOSCH [Электронный ресурс] / Е. Хапов. – Режим доступа : <http://www.kharov.ru/?p=754>. – Загл. с экрана.

3. Бажинов, А. В. Методика определения основных параметров электросиловой установки гибридного автомобиля [Текст] / А. В. Бажинов, А. С. Паникарский, В. С. Боженков // Автомобильный транспорт : сб. науч. тр. ХНАДУ, 2009. – Вып. 25. – С. 145–150.

4. Гібридні автомобілі [Текст] / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Серіков та ін. – Х. : ХНАДУ, 2008. – 327 с.

5. Автомобильная энергетика: современные направления и перспективы развития [Текст] / В. В. Карницкий, Л. И. Вахошин, И. М. Минкин, А. С. Разумнов // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 6.

6. Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль [Текст] / А. Л. Карунин, С. В. Бахмутов, В. В. Селифонов и др. // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 7.

7. Преимущества асинхронного генератора [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.megadomoz.ru/article/247/122/>. – Загл. с экрана.

8. Система Стоп-старт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://systemsauto.ru/electric/stop\\_start.html](http://systemsauto.ru/electric/stop_start.html). – Загл. с экрана.

9. Разработка устройства управления асинхронным стартер-генератором [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.freepatent.ru/patents/2453034>. – Загл. с экрана.

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2013 р.*