

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ТЯГОВИХ ПРИВОДІВ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

*АННОТАЦІЯ. Проаналізовані у порівнянні системи транспортних тягових електроприводів постійного та змінного струму з урахуванням показників ефективності, надійності, вартості та складності реалізації регулювання у тяговому та рекуперативному гальмівному режимах.*

*Ключові слова: аналіз, порівняння, електропривід змінного струму, електропривід постійного струму.*

*АННОТАЦИЯ. Проанализированы в сравнении системы транспортных тяговых электроприводов постоянного и переменного тока с учетом показателей эффективности, надежности, стоимости и сложности реализации регулирования в тяговом и рекуперативном тормозном режимах.*

*Ключевые слова: анализ, сравнение, электропривод переменного тока, электропривод постоянного тока.*

*SUMMARY. Systems of transport with DC and AC electric drives taking into account indicators of efficiency, reliability, cost and complexity of realisation of regulation in traction and generative braking modes are analysed.*

*Keywords: the analysis, comparison, the AC electric drive, the DC electric drive.*

---

### Вступ

До цього часу існують технічні суперечки відносно застосування визначеного типу електроприводу в автономних транспортних засобах. При цьому ситуацію суттєво загострила вже успішно реалізована концепція гібридного приводу, тобто комбінованої рушійної системи на базі електроприводу та двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).

З одного боку цілком природним є той факт, що електропривід постійного струму займає домінуюче положення в системах тягових приводів автономних транспортних засобів із джерелом постійного струму, що в цілому суттєво спрощує схемотехніку силової частини. Однак упродовж усього часу розробки транспортних електроприводів альтернативою приводам постійного струму виступають електроприводи змінного струму з асинхронними, синхронними електродвигунами, а також з вентильними машинами й т.п., що обумовлено вагомими успіхами сучасних технологій у електромашинобудуванні.

**Метою** статті є порівняльний аналіз існуючих і перспективних систем тягових транспортних електроприводів.

### Виклад основного матеріалу

Проаналізуємо типи електричних машин, які пропонувалися або традиційно

пропонуються як тягові двигуни для приводів автономного електротранспорту. У табл. 1 наведено їхнє порівняння по ряду показників, що дозволяють оцінити можливість застосування зазначених двигунів на автономному електротранспорті. У стовпчику 9 за базову прийнята маса серієсного двигуна постійного струму. Зазначимо одразу, що наведеним переліком не вичерпуються всі типи електричних машин, пропонує для даного використання, оскільки постійно з'являються нові типи електродвигунів (двоякірні; електростатичні; з магнітним опором, що перемикається; асинхронні із двома зустрічно обертовими роторами, тощо). Однак на практиці знаходить застосування досить обмежене число типів електричних машин, які найбільш повно відповідають вимогам, що ставляться до тягових електроприводів.

У більшості випадків тяговим електродвигунам постійного струму протиставляють інші типи двигунів, аргументуючи це наявністю колекторного вузла. При цьому, як правило, не розглядається забезпечення максимального ККД всієї системи, з урахуванням взаємодії джерела живлення, силового перетворювача й тягового двигуна, та забезпечення оптимальних тягових і регулювальних характеристик привода,

Таблиця 1.

## Комплексне порівняння тягових електродвигунів

№ п/п	Тип електродвигуна	Тип збудження	Макс. швидкість (об/хв.)	Можливість перевантаження	Формування тягових характеристик	Необхідність DC-AC перетворення	Компоновка у мотор-колесо	Відносна маса	ККД $\eta_{\text{ср}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Колекторний постійного струму (ПС), серієсний	ел.ма гн.	>6000	велика	просте	немає	складна	1,0	0,84
2.	Колекторний ПС з незалежн. збудженням.	ел.ма гн.	>6000	велика	відносно просте	немає	складна	1,3	0,9
3.	Колекторний ПС зі зміш.зб.	ел.ма гн.	>6000	велика	відносно просте	немає	складна	1,4	0,9
4.	Колекторний ПС	пост. магн.	>6000	велика	відносно просте	немає	ускладнена	1,3	0,91
5.	Колекторний з дисковим якорем	пост. магн.	>6000	велика	відносно просте	немає	ускладнена	0,5	0,95
6.	Асинхронний з короткозамкн. ротором	ел.магн.	>1000 0	мала	складне	є	проста	0,7	0,93
7.	Асинхронний з фазним ротором	ел.ма гн.	>1000 0	велика	складне	є	ускладнена	0,9	0,93
8.	Асинхронний з торцевим повітряним зазором	ел.ма гн.	>1000 0	мала	складне	є	проста	0,7	0,92
9.	Синхронний з електромаг. зб.	ел.ма гн.	>1000 0	велика	складне	є	проста	0,6	0,93
10.	Синхронний з постійними магнітами	пост. магн.	>1000 0	велика	складне	є	проста	0,5	0,93
11.	Синхронний дисковий	пост. магн.	>1000 0	велика	просте	є	проста	0,3	0,96
12.	Синхронний зі змішаним збудж.	ел.ма гн., пост. магн.	8000	велика	складне	є	ускладнена	0,7	0,9
13.	Вентильний багатофазн. багатополосн.	пост. магн.	>1000 0	велика	складне	немає	проста	-	-

можливості здійснення режиму рекуперативного гальмування й т.п.. Тому, в даній роботі започаткована спроба об'єктивно оцінити різні типи автономних тягових приводів, створених за останні 30-40 років. При порівнянні приводів змінного та постійного струмів як позитивний аргумент для системи змінного струму ураховує зменшення ваги тягового електродвигуна на 30% [6]. Зазначимо, що в цьому випадку мова йде не про загальнопромисловий, а про спеціалізований асинхронний двигун, розрахований на робочу частоту 400 ... 500 Гц. Крім того, за таким порівнянням не враховується збільшення масогабаритних показників перетворювача й редуктора (для керування двигуном постійного струму необхідний один ключовий елемент, а для регулювання трифазного асинхронного двигуна необхідно шість ключів). Навіть за умови використання сучасних транзисторних (IGBT і MOSFET) модулів масогабаритні показники перетворювача для приводів постійного струму будуть у 1,5-2 рази кращі.

Привід змінного струму має гірші масогабаритні показники знижувального редуктора, що обумовлено високою частотою обертання асинхронного двигуна (10 - 30 тис. об/хв) [4], що, у свою чергу, необхідно для поліпшення охолодження і для зменшення маси двигуна. У той саме час у приводі постійного струму із частотою обертання вала двигуна до 6000 об/хв, як правило, можна обійтися одноступінчастим редуктором або двоступінчастою автоматичною коробкою передач.

Наступний фактор, що часто приводить до недолік двигунів постійного струму – наявність колекторно-щіткового вузла, що знижує надійність, збільшує вартість електродвигуна та експлуатаційні витрати. Однак сучасні технології тягових електродвигунів постійного струму забезпечують надійність і збільшення ресурсу колекторно-щіткового вузла. Так, наприклад, проточка колекторного вузла повинна виконуватись при зношуванні 0,2 ... 0,4 мм, а ресурс до проточки становить 60 ... 100 тис. км пробігу. При цьому зношування щіток становить 2,5...3,8 мм. При початковій висоті

щіток 20 ... 25 мм термін експлуатації (навіть без заміни щіток і проточки колектора) становить близько 10 років (при середньостатистичному річному пробігу 7 ... 10 тис. км). Таким чином, розглянутий негативний фактор тягових двигунів постійного струму не слід вважати визначальним.

Далі, на наш погляд, слід розглянути рівень складності схемотехнічних і алгоритмічних рішень при формуванні тягових і генераторних (рекуперативне гальмування) характеристик електродвигуна у транспортному приводі. Відомо, що найкращі тягові характеристики має двигун постійного струму послідовного збудження (серієсний двигун), що обумовило його широке застосування на електротранспорті. Якщо, як тяговий, застосовується будь-який інший тип електродвигуна, то за допомогою системи регулювання необхідно у той чи інший спосіб наблизитися до реалізації природної тягової характеристики серієсного.

Відомо, що для двигунів постійного струму незалежного збудження застосовується двозонне регулювання. У першій зоні по колу якоря регулюється напруга від нуля до максимуму при незмінному максимальному струмі збудження, а у другій зоні регулюється струм у колі обмотки збудження від максимального значення до мінімального при незмінній напрузі на якорі, що дорівнює напрузі бортової акумуляторної батареї. Керування асинхронними тяговими двигунами здійснюється відповідно до однієї із двох стратегій: впливом на ковзання або орієнтацією поля [5]. Природно, що все це вимагає додаткових апаратних засобів керування й відповідних алгоритмічних рішень, що ускладнює схемотехніку й знижує надійність.

Аналогічні проблеми виникають при здійсненні режиму генераторного гальмування тягового електродвигуна. Тут також необхідна реалізація певних алгоритмів керування та апаратних перемикачів. Відзначимо, що на відміну від тягового режиму, режим рекуперації простіше й ефективніше здійснюється для двигуна з незалежним збудженням.

У системі привода з асинхронним короткозамкненим тяговим електродвигуном немає необхідності робити які-небудь апаратні перемикання, тому що такий двигун переходить у генераторний режим за умови досягнення частоти обертання вала вище синхронної швидкості. Тобто регулювання величини гальмівного моменту двигуна здійснюється шляхом зміни частоти напруги живлення статорної обмотки. Однак це передбачає споживання енергії від джерела, через необхідність роботи силового трифазного перетворювача. При цьому кількість енергії, що повертається в акумуляторну батарею в рекуперативному режимі, буде значно менше, ніж в аналогічних умовах у двигуна постійного струму. Це дозволяє зробити висновок, що рекуперативні можливості асинхронного привода з огляду на ефективність енергетичного балансу у транспортній системі електроживлення значно поступаються приводу з колекторним двигуном постійного струму.

Таким чином, тягові електродвигуни змінного струму за своїми можливостями реалізації тягових і генераторних режимів в основному програють двигунам постійного струму через ускладнення алгоритмічних та схемотехнічних рішень.

Звернемось тепер до порівняння складності конструкції та виготовлення приводів постійного й змінного струмів. На перший погляд колекторний двигун складніше по конструкції якоря й колекторно-щіткового вузла, створення яких вимагає застосування спеціальних способів зварювання (пайки) при з'єднанні виводів обмотки якоря з колекторними пластинами й т.п. Однак, якщо більш ґрунтовно розглянути питання конструювання та виготовлення тягового асинхронного електродвигуна, то й тут не все так просто. У порівнянні з виготовленням загальнопромислових двигунів, при створенні тягових машин потрібне застосування спеціальних, більш дорогих матеріалів і сплавів, більш прецизійне виготовлення ряду вузлів і т.п. Крім того, якщо розглядати всю систему привода в комплексі, то слід передбачити неминуче ускладнення силового перетворювача й системи регулювання, а також складність конструкції та виготовлення високошвидкісного бага-

тоступінчастого редуктора, що також слід віднести до недоліків такого типу привода. Тому можна стверджувати, що за показниками складності конструкції та самого процесу виготовлення, позиції привода змінного струму не можна вважати безумовно переважними (виграшними).

Часто тягові двигуни оцінюють з огляду на можливість їх застосування в конструкції типу „мотор-колесо”. Природно, що безколекторні електродвигуни тут мають безумовну перевагу порівняно з колекторними. Безконтактні електродвигуни простіше “вписуються” у конструкцію мотор-колеса, вони більш надійні в експлуатації, особливо з урахуванням місця їхнього розташування (безконтактна система у безпосередній близькості від поверхні дороги при активному впливі пилу, бруду, води й т.п. буде більш стійкою). Однак, у силу ряду причин, для малотоннажного транспорту застосування мотор-колес у цей час досить проблематичне. Одна із причин цього – відносно велика невіднесена маса мотор-колеса, яку важко зменшити при сучасному рівні розвитку технологій через необхідність установки в моноблочі мотор-колеса (крім власне двигуна) понижувального редуктора, що призводить до значного ускладнення розглянутого вузла транспортного засобу. Із цієї причини на сьогоднішній день такий недолік колекторного двигуна (ускладнення реалізації мотор-колеса) не можна вважати істотним, тому що зазначена конструкція на практиці мало використовується.

Одним з визначальних факторів при виборі систем привода є коефіцієнт корисної дії. Якщо брати до уваги тільки ККД електродвигунів, то вважається, що в асинхронного двигуна через відсутність ряду складових втрат у колекторно-щітковому вузлі, додаткових полюсах, а також менших втрат на збудження більш високий ККД порівняно з тяговим двигуном постійного струму. Однак у цьому випадку необхідно розглядати ККД всієї системи привода, включаючи джерело живлення, перетворювач і редуктор. Докладні системні дослідження для електроприводу постійного струму проведені в роботі [1].

Стосовно систем приводів змінного струму подібні дослідження представлені недостатньо повно, тому обмежимося якісними оцінками цього показника. Вище відзначалося, що трифазний інвертор, який живить асинхронний двигун, містить шість ключових елементів і, якщо в широтно-імпульсному перетворювачі для приводу постійного струму у статичному режимі працює один ключовий елемент, то в трифазному інверторі одночасно відкритими бувають щонайменше два ключі, що приводить до збільшення статичних втрат у пристрої. При цьому трифазний інвертор має набагато більші динамічні (в режимі перемикання напівпровідникових ключів) втрати, ніж імпульсний регулятор знижувального типу, який використовується як силовий перетворювач у приводі постійного струму. Крім того, зростають втрати енергії й у знижувальному редукторі, тому що кожна пара шестерень знижує ККД механічної трансмісії й приводу в цілому. Таким чином, можна стверджувати, що більш високий ККД тягового асинхронного електродвигуна не визначає однозначно кращий результуючий ККД всієї системи приводу.

Далі, розглянемо ще один фактор, який значною мірою визначає застосування того або іншого типу приводу – його вартість. Відзначимо, що цей показник далеко не завжди вдається визначити однозначно. Тому доцільно вдатися знов-таки до непрямой оцінки, ґрунтуючись не на кількісних, а на якісних показниках.

Найчастіше, коли розглядається питання співвідношення вартості двигунів постійного й змінного струмів, перевага однозначно віддається останнім і при цьому підкреслюється, що через складність конструкції й виготовлення, а також за наявності колекторно-щіткового вузла, двигуни постійного струму дорожчі. Однак такі твердження базуються на тому, що зіставляються загальнопромислові асинхронні електродвигуни великосерійного або масового виробництва й тягові електричні машини постійного струму, спеціально розроблювальні для автономного електротранспорту. Тут варто врахувати, що асинхронний тяговий двигун – це практично завжди спеці-

льна розробка, причому не на стандартну мережну напругу і частоту, а на напругу конкретного бортового джерела живлення, що здебільшого відповідає діапазону 48 - 400В при частоті, що перевищує 50Гц. Таким чином, щораз при розробці нового транспортного засобу найчастіше потрібно створювати новий асинхронний електродвигун, у той час як для двигунів постійного струму цей етап вже давно пройдений.

Особливої уваги заслуговує також питання вартості перетворювальних пристроїв (силових напівпровідникових регуляторів), що здійснюють керування тяговими електродвигунами. Вище вже відзначався різний рівень складності перетворювальних пристроїв для приводів постійного й змінного струмів. Природно, що трифазний автономний інвертор дорожче широтно-імпульсного перетворювача постійної напруги (за інших рівних умов), питання тільки в тому, на скільки вони відрізняються в ціні. Приблизна оцінка вартості основних комплектуючих (напівпровідникових модулів, конденсаторів фільтрів, драйверів і т.п.) дозволяє зробити висновок про те, що ця різниця сягає 2 - 5 рази.

У табл.2 наведені орієнтовні ціни тягових електродвигунів і транзисторних перетворювачів (привід постійного струму), наявних у роздрібному продажі (відзначимо, що і в США і на європейському ринку співвідношення цін на ці компоненти приблизно одного рівня).

Таблиця 2

**Співвідношення потужність/ціна**

Електродвигуни		Перетворювачі	
Р, кВт	Ціна \$	Р, кВт	Ціна \$
9,6	654	12,6	650
15,6	1020	18,0	750
21,3	1430	27,0	1095
27,3	1647	47,5	1325

Досить важко оцінити вартість високошвидкісного багатоступінчастого редуктора, необхідного для приводу змінного струму. Але, з огляду на його відносну складність порівняно з одноступінчастим, можна припустити, що ціна багатоступінчастого редуктора вище. У підсумку, оцінюючи вартість всіх компонентів, можна із упевненістю відзначити, що ціна приводу

постійного струму може бути значно нижче ціни асинхронного. У той час як вартість приводу постійного струму перебуває в межах \$1300 - \$3000 (при потужності 10 - 30 кВт), то привід змінного струму оцінюється від \$4000 до \$16000. При цьому не враховується вартість багатоступінчастого редуктора, ціна якого вище ціни традиційної коробки передач або одноступінчастого редуктора приводу постійного струму.

Розглянемо вентильні машини з постійними магнітами. Як відомо з літературних джерел [2], по масогабаритним показникам, по можливості реалізації великої частоти обертання та створення мотор-колів, ці машини відрізняються у кращу сторону від двигунів постійного струму. Вони також мають високий ККД – у деяких випадках до 96%. Основними недоліками таких двигунів є складність формування тягових і генераторних характеристик, а також їхня висока вартість. Тягові характеристики двигуна з постійними магнітами являють собою сімейство паралельних прямих ліній (у функції вхідної напруги) і аналогічні характеристикам колекторного двигуна постійного струму з фіксованим електромагнітним збудженням. При цьому впливати на жорсткість характеристики у процесі регулювання неможливо, тому що магнітний потік збудження не змінюється. Очевидно, що з погляду оптимізації споживаної потужності й забезпечення необхідного моменту на валу електродвигуна, таке регулювання залишає бажати кращого.

Досить складно також вирішується і реалізація рекуперативного гальмування. З одного боку, зазначена машина має прекрасні генераторні можливості (постійний потік збудження і немає необхідності здійснювати цей режим за допомогою додаткових схемотехнічних або алгоритмічних засобів). З іншого боку, режим рекуперативного гальмування буде повністю некеруваним, тому що відсутня можливість впливати на потік збудження двигуна, що не дозволяє здійснити плавне гальмування, а також, що не менш важливо, регулювати кількість енергії, що надходить в акумуляторну батарею. Слід зазначити, що регульований генераторний режим у такому двигуні здійснити можна, але для цього необхід-

ний додатковий силовий перетворювач, увімкнений паралельно тяговому. Аналізуючи вартісні показники електричних машин з постійними магнітами слід зазначити, що, незважаючи на відносну простоту конструкції й технології виготовлення, такі двигуни є досить дорогими, тому що для досягнення високих значень індукції в повітряному зазорі двигуна необхідні коштовні магніти з рідкоземельних металів. У силу зазначених причин вентильні двигуни з постійними магнітами знаходять не дуже широке застосування в тягових приводах і, як правило, використовуються в експериментальних розробках.

Світова тенденція виглядає так. Великі автомобільні фірми й електротехнічні концерни розробляють електромобілі та інший автономний транспорт зокрема і гібридні приводи на базі новітніх технологій, матеріалів, конструкторських рішень і т.д. Природно, що й вартості таких зразків досить високі: так двомісний електромобіль EV-1 фірми GENERAL MOTORS коштує \$35000, тобто, практично втричі дорожчий за автомобіль аналогічного класу. При цьому фірма затратила на його розробку понад \$350 млн. [4]. Аналогічні приклади можна привести й по інших великих автомобільних компаніях. Зокрема, TOYOTA MOTORS затратила на розробку електромобіля RAV-4 біля \$400 млн. при вартості однієї машини \$40000 [7].

Завершуючи порівняльний аналіз, зазначимо, що по цілому ряду розглянутих показників асинхронний і вентильний приводи для автономного електротранспорту не є однозначно виграшними, а за вартісними показниками явно поступаються приводу постійного струму. Незважаючи на певний недолік даної роботи щодо кількісних оцінок, пов'язаний з недостатністю об'єктивної інформації, з досить великим ступенем ймовірності можна стверджувати, що поряд з інтенсивним розвитком приводів змінного струму (включаючи вентильні машини з постійними магнітами), привід з колекторними двигунами постійного струму також безупинно розвивається й удосконалюється і скоріш за все (з урахуванням зазначених тенденцій) ще тривалий час ці напрямки будуть розвиватися паралель-

но з урахуванням конкретних умов, завдань і необхідних вихідних параметрів.

### Висновки

1. Тягові електродвигуни змінного струму за можливостями реалізації тягових і генераторних режимів в основному програють двигунам постійного струму через ускладнення необхідних алгоритмічних та схемотехнічних рішень.
2. Вартісні показники силового електронного блоку для приводів змінного струму у 2-2,5 рази більші ніж у функціонально аналогічного обладнання для приводів постійного струму.
3. Для потреб автономного низьковольтного технологічного електротранспорту найбільш ефективними і доцільними (простота, надійність, вартість) є приводи постійного струму.

### Літератури

1. Павлов В. Б., Шидловский А. К., Скиданов В. М., Рычков В. А. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока // - К.: Наук. Думка, 1987.- 284 с.
2. Anderson William M., Cambier Craige S.. Integrated electric vehicle drive // SAE Techn. Rep. Ser.- 1991.- № 910246.- P. 63 - 68.
3. Austrian EV progress // Elec. Veh. Progr.- 1990.- 12, № 20.- P. 3 - 4.
4. Bartlett Jeff, Keebler Jack. General Motors EV1 // Motor Trend.- June 1996.- P 69 - 72.
5. Bolognani Silverio, Buja Giuseppe S. DC link current control for high performance CSIM drives // IEEE Ind. Appl. Soc. 21st Annu. Meet., Denver, Colo. Conf. Rec. Pt. 1.-New York (USA).- 1986.- P. 112 - 116.
6. Burke A.F. Electric vehicle propulsion and battery technology 1975 - 2005 // Proc. 25th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf., Reno, Nev.- New York (USA).- 1990.- Vol. 6.- P. 119 - 135.
7. David Hermance, Shoichi Sasaki. Hybrid an electric vehicles take to the streets // IEEE Spectrum.- November 1998.- P. 48 - 52.

Рецензент: С.В. Іносов, к.т.н., доцент  
(КНУБА)

Отримано: 19.04.2010 р.