

ВЕНТИЛЬНИЙ ДВИГУН ДЛЯ ПРИВОДУ КОЛІС ТРАМВАЮ З НИЗЬКОЮ ПОСАДКОЮ

© Ткачук В.І., Біляковський І.Є., 2010

Запропоновано вентильний реактивний двигун з ємнісними буферами енергії для приводу коліс трамваю з низькою посадкою, який за механічною та регулювальними характеристиками може успішно конкурувати з тяговими колекторними двигунами за вищої надійності і меншого об'єму активної частини.

The Switched Reluctance Motor of direct current with the parallel buffer of energy is offered for the wheels drive to the tram with the low landing. Speed-torque and regulation characteristic allow an engine successfully to compete with traction collector engines. They have higher reliability and less volume of active part.

Вступ

Специфічні вимоги до Львівського трамваю – колія 1000 мм, яка проходить вузькими вулицями архітектурного заповідника з частими поворотами малого радіуса, з підйомами і спусками – поряд із сучасними тенденціями розвитку техніки сприяли появі проекту Львівського трамваю з низькою посадкою.

Сьогоднішнє відродження інтересу до трамваю в світі зумовлене можливістю за допомогою сучасних технічних рішень максимально збільшити пропускну здатність трамвайних маршрутів.

Цими рішеннями є:

- Низький рівень підлоги дає змогу з мінімальним часом здійснювати посадку-висадку безпосередньо з тротуару. Сучасний трамвай є мало не єдиним громадським транспортом, який забезпечує реальну можливість повноцінного користування для інвалідів у візках, адже, в ідеальному варіанті, за облаштування зупинок з пішохідною частиною впритул до рейок, не вимагає спеціальних заходів (які забирають час і гальмують транспортний потік) для посадки-висадки таких пасажирів.
- Сучасна електроніка дозволяє узгодити рух трамваїв на маршруті із рештою транспортних потоків міста, які перетинають колії, створюючи, отже, безперешкодний рух трамвайного потяга від зупинки до зупинки;
- Більша безпека і стабільність порівняно з іншими видами громадського транспорту (завдяки рейкам трамвай для учасників руху є передбачуванішим);
- Простіша конструкція візків, яка не потребує спеціальної системи тяг по всій довжині потяга, що має запобігати «складанню» двосекційного потягу з поворотними візками.

Постановка проблеми

Технічним завданням передбачено зовнішнє розташування чотирьох двигунів на рамі (рис. 1). Розроблення двигуна для приводу колеса трамваю дещо ускладнене самою специфікою роботи, оскільки необхідно спроектувати двигун у блоці з редуктором і гальмівним механізмом, не порушивши при цьому чітко задані розміри розробленої моделі візка.

Для приводу колеса трамвая запропоновано вентильний реактивний двигун (ВРД) з ємнісними накопичувачами енергії (ЄНЕ).

Вентильний двигун звичайної конструкції – це електромеханотронний перетворювач, який у найпростішому випадку складається з електромеханічного перетворювача (ЕМП), давача поло-

ження ротора (ДПР) та електронного комутатора (ЕК). ЕК можуть бути використані для регулювання частоти обертання, моменту тощо. Тому до базової структури доцільно ще застосувати систему керування (СК). Структурна схема вентиляного двигуна наведена на рис. 2.

Електромеханічний перетворювач та давач положення ротора зазвичай об'єднують в один конструктивний вузол, а комутатор і систему керування – в інший.

Промислове освоєння вентильних двигунів стало можливим завдяки значним досягненням у галузі створення силових транзисторів, інтегральних мікросхем і мікропроцесорів, а також високоенергетичних постійних магнітів. Зменшились габарити силових комутаційних блоків, зросли функційні можливості. Проте у разі використання постійних магнітів виникають дві проблеми: по-перше, вони дорогі; по-друге, максимальна густина магнітного потоку обмежена значенням намагніченості. Хоч феритові магніти дешевші, однак через низьку намагніченість неможливо отримати великий момент.

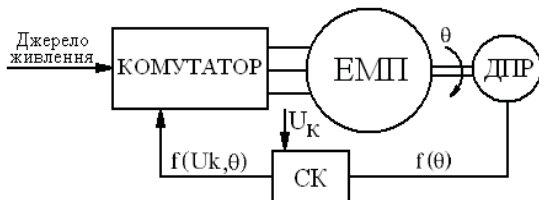


Рис. 2. Структурна схема вентиляного двигуна

У той же час електромеханічний перетворювач можна виконати із пасивним вторинним елементом. При цьому можна забезпечити достатньо рівномірну частоту обертання у режимі самокомутації. Донедавна, в електроприводах вентильні реактивні двигуни застосовувались рідко, бо використовувались із загальновідомими електронними перетворювачами, і тому їхні енергетичні показники були невисокими. Колектив кафедри електричних машин та апаратів Львівської політехніки запропонував схеми електронних перетворювачів з ємнісними накопичувачами [1], застосування яких вирішує три проблеми: по-перше, утилізується енергія, яка запасена в електромагнітному полі якоря ЕМП; по-друге, обмежується наростання напруги на колектор-емітерному переході транзисторного ключа комутатора до допустимого рівня; по-третє, значно зменшуються динамічні втрати на перемикання транзистора перетворювача за рахунок майже миттєвого перехоплення струму вимикання транзистора колом заряду конденсатора.

Для підвищення стійкості роботи електронних компонентів та енергетичних показників в ЕМП ВД необхідно застосовувати конструкції статорів, які забезпечують відсутність електромагнітних зв'язків між секціями.

Для вентильних двигунів найдоцільнішими є конструкції з явнополюсним статором, оскільки за допомогою саме таких конструкцій можлива магнітна ізоляція окремих його секцій.

Найвідомішою є класична конструкція, яка наведена на рис. 3.

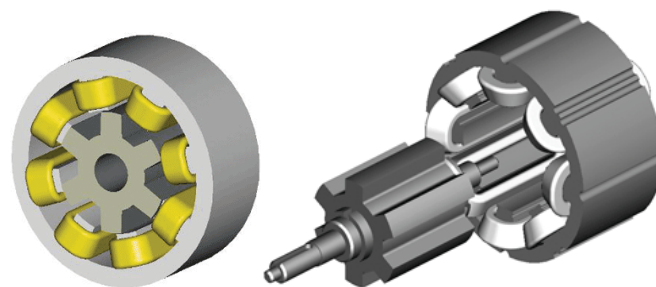


Рис. 3. ВРД класичної конструкції

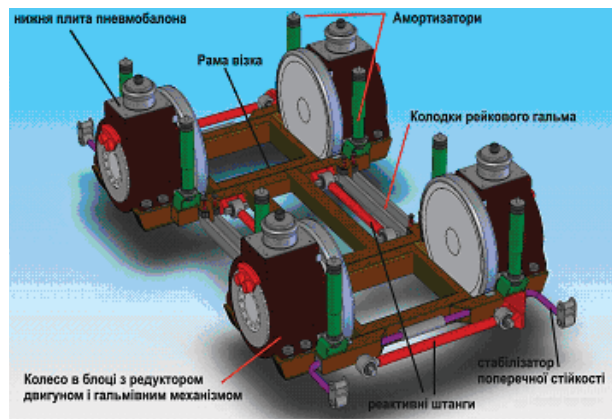


Рис. 1. Рама візка Львівського трамваю

Недоліком цієї конструкції вентильного реактивного двигуна є те, що у разі її застосування на інтервалі одночасного збудження суміжних секцій можливий деякий їх взаємний вплив, що може бути джерелом незначного збільшення втрат і пульсацій електромагнітного моменту.

Для вентильного реактивного двигуна великого діаметра із значною кількістю зубців на роторі доцільніше використати псевдо U-подібну конструкцію статора [2], оскільки це забезпечує повну магнітну ізоляцію і дає змогу зменшити, порівняно з класичною конструкцією, довжину магнітних силових ліній, а отже, і втрати в сталі.

Задачі досліджень

В індукторних машинах електромеханічне перетворення енергії здійснюється за рахунок модуляції параметрів машини. У машинах із ненасиченим магнітним колом енергія, яка запасається у магнітному полі дорівнює енергії, що перетворюється у механічну, а тому й коефіцієнт віддачі ВД з ЕМП індукторного типу та однопівперіодним комутатором традиційного виконання, навіть, нехтуючи тепловими втратами у машині не може перевищувати 50%.

Тому для покращання енергетичних показників ВД з пасивним ротором необхідно використовувати енергію, яка запасена у магнітному полі обмотки якоря, для форсування струму секції. Задача створення ВД на базі простої, технологічної індукторної машини зводиться до створення таких схемних рішень, які б дозволили використовувати накопичену у магнітному полі секції якорної обмотки енергію для виконання корисної роботи.

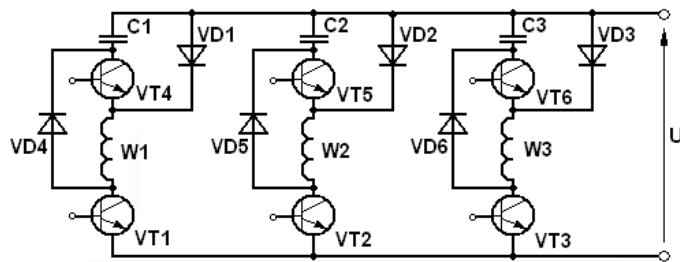


Рис. 4. Принципова електрична схема транзисторного комутатора з послідовними ємнісними накопичувачами у кожній секції

З цією метою на кафедрі електричних машин та апаратів Національного університету “Львівська політехніка”, розроблено принципові схеми електронних комутаторів, які мають підвищену надійність і забезпечують рекуперацію енергії магнітного поля [3].

На рис. 4. наведено одну зі схем транзисторних комутаторів із послідовними ємнісними накопичувачами.

Розглянемо принцип роботи цієї схеми. Коли ротор займе положення кута

вмикання β (рис. 5), сигнали $K1 - K4$ давача положення ротора відкриють силові ключі $VT1$ та $VT4$, які будуть відкритими протягом кута комутації γ .

Секція обмотки якоря ЕМП $w1$ отримує живлення від джерела і послідовно згідно з ним сполученого та зарядженого у попередньому циклі конденсатора $C1$ через ці ключі. Діод $VD1$ буде закритим прикладеною до нього у зворотному напрямі напругою конденсатора $C1$.

Струм секції $w1$ форсовано зростатиме, конденсатор $C1$ розряджатиметься і коли напруга на ньому досягне нульового значення, відкриється діод $VD1$, секція $w1$ під’єднається до джерела живлення по колу: діод $VD1$, транзисторний ключ $VT1$. Під дією електромагнітного моменту ротор повертається і за досягнення значення кута комутації γ закриваються ключі $VT1$ та $VT4$. Під дією ЕРС самоіндукції струм у секції $w1$ почне протікати по колу: діод $VD4$, конденсатор $C1$, діод $VD1$. Конденсатор $C1$ заряджається, струм секції зменшується. Для інших секцій цей процес повторюватиметься через кут

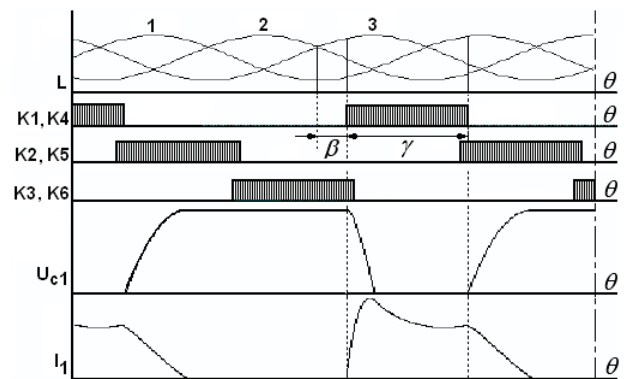


Рис. 5. Діаграма роботи транзисторних ключів, напруга на конденсаторі та струм секції ВД

$\frac{2 \cdot \pi}{m}$, де m – кількість секцій. При цьому утилізується енергія, яка запасена в електромагнітному

колі якоря ЕМП, обмежується наростання напруги на колектор-емітерному переході транзисторного ключа комутатора до допустимого рівня, а також значно зменшуються динамічні втрати на перемикання транзистора комутатора за рахунок майже миттєвого перехоплення струму.

Експериментальні дослідження та розрахунки показують, що застосування схем з емнісними накопичувачами енергії у ВД з пасивним ротором покращують його коефіцієнт віддачі у 1.7–1.8 раз порівняно з схемою зі стабілітронним захистом від перенапруг на силових ключах комутатора.

Виклад основного матеріалу

Згідно з технічним завданням двигун повинен забезпечити такі технічні параметри трамваю: прискорення – 1,4 м/с², максимальна швидкість руху – 70 км/год., максимальний кут підйому – 8°. Розміри двигуна не повинні виходити за межі 500 мм за довжиною та 600 мм – за шириною.

Проектування двигуна проведено за використання розробленої на кафедрі електричних машин та апаратів автоматизованої системи проектування (АСП) вентильних реактивних двигунів з накопичувачами енергії [4]. Система має відкриту структуру та дає змогу здійснювати розширення та модернізацію під час розвитку завдань проектування та дослідження ВРД з ЄНЕ. Вона складається з головної програми, 16-ти підпрограм та файлів даних.

Підсистема готує необхідні вхідні дані для здійснення всесторонніх досліджень електроприводу на базі ВД із ЄНЕ в підсистемі автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів.

Перед початком проектування двигуна, зроблено деякі зміни у комп'ютерну програму проектування вентильних реактивних двигунів з накопичувачами енергії з метою адаптації її для синтезу двигунів вищих потужностей та напруг. У програмному файлі введення вхідних даних й вибору напрямку проектування зроблено такі зміни: розширено діапазони розрахункової потужності двигуна, напруги живлення та моменту. Після модернізації програми успішно проведено її тестування.

Вимоги технічного завдання на проектування конкретного вентильного двигуна можуть бути настільки різноплановими, що є недоцільним створення універсальної автоматизованої системи проектування. Тому, у цій САПР задаються тільки основні параметри вентильного реактивного двигуна, такі як напруга живлення, потужність або момент на валу і частота обертання. Інші параметри задаються під час проектування у діалоговому режимі.

На рис. 6 наведена структурна схема розрахунку і проектування ВРД.

Під час проектування двигуна прийнято псевдо U-подібну конструкцію статора, оскільки її доцільно використовувати для вентильного двигуна достатньо великого діаметра з великою кількістю зубців на роторі, і вона дає змогу значно зменшити, порівняно з класичною конструкцією, довжину магнітних силових ліній, а отже, і втрати в сталі.

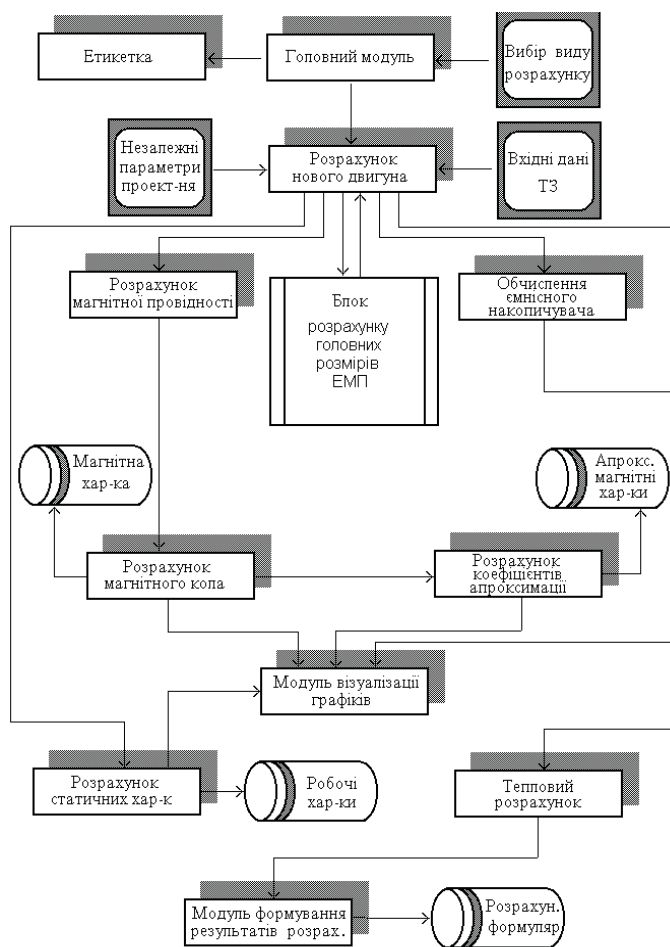


Рис. 6. Структурна схема розрахунку двигуна

Як правило, методики проектування традиційних типів електричних машин (асинхронних, синхронних, постійного струму) базуються на виборі величин електромагнітних навантажень (індукції у повітряному проміжку і окремих частинах магнітопроводу, лінійного навантаження, густини струму тощо). У зв'язку з відсутністю досвіду проектування ВРД вказані величини потребують відповідних уточнень.

Використовуючи теорію електромеханічного перетворення енергії у ВРД з ємнісними накопичувачами енергії [7], а також порівняльний аналіз моменту і електромагнітних навантажень ВРД з буферами енергії з колекторними двигунами постійного струму в [5], наведено вирази для розрахунку геометричних розмірів магнітопроводу ВРД з пасивним ротором класичної та псевдо-U-подібної конструкції. Розрахунок головних розмірів активної частини ЕМП базується на співвідношенні

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{M \cdot \mu_0}{m \cdot q \cdot B_\delta^2 \cdot K_\mu \cdot \alpha_r \cdot K_L \cdot \lambda \cdot \delta \cdot (1 - \cos \gamma)}}$$

звідки видно, що на початковій стадії проектування більшість величин, які входять в наведене співвідношення, за винятком M , невідомі й не можуть бути визначені за даними технічного завдання на проектування. Через відсутність досвіду проектування вентильних двигунів з пасивним ротором не можна також скористатись прийнятим в практиці проектування традиційних типів електричних машин методом, коли за даними спроектованих машин аналогічної або близької конструкції та потужності попередньо задаються рекомендованими значеннями електромагнітних навантажень та інших незалежних змінних.

Вибір значень незалежних параметрів під час проектування двигунів такого типу здійснюється, ґрунтуючись на результатах досліджень, проведених на кафедрі електричних машин та апаратів Львівської політехніки.

Критерієм вибору оптимального варіанта двигуна слугувала механічна характеристика та максимальний момент, який зможе розвинути двигун.

В результаті проектування отримано двигун з такими даними:

Напруга живлення – 550 В; Корисна потужність – 32 кВт; Частота обертання, 1500 об/хв; Коефіцієнт віддачі – 75,38 %; Момент навантаження – 254 Нм; Діаметр статора – 370 мм; Зовнішній діаметр статора – 480 мм; Аксіальна довжина статора – 370 мм; Ємність нагромаджувального конденсатора – 2.5 мкФ.

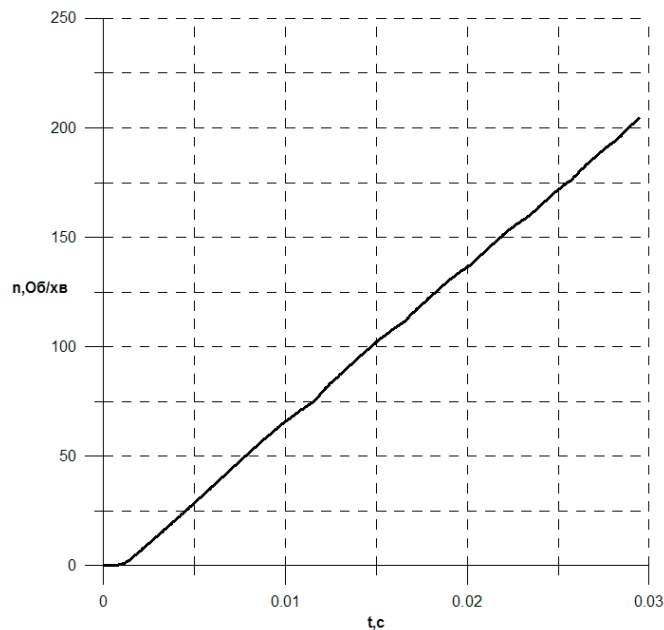


Рис. 7. Залежність швидкості обертання ротора від часу під час пуску

Двигун досліджували з використанням розробленої на кафедрі ЕМА Львівської політехніки автоматизованої підсистеми дослідження ВРД з ємнісними буферами енергії [6], вхідними даними для якої є розрахований за допомогою програми проектування файл вихідних даних. Було проведено кілька варіантів симуляції його роботи у пускових та квазіусталених режимах роботи, при навантажувальних моментах – максимальному 254 Нм (рух трамваю з максимальним прискоренням), та 20 Нм (рух з максимальною швидкістю на горизонтальній ділянці колії).

На рис. 7 і 8 наведено, відповідно, графічні залежності швидкості обертання ротора та моменту, прикладеного до вала двигуна на початку пуску, а на рис. 9 – механічну характеристику спроектованого двигуна.

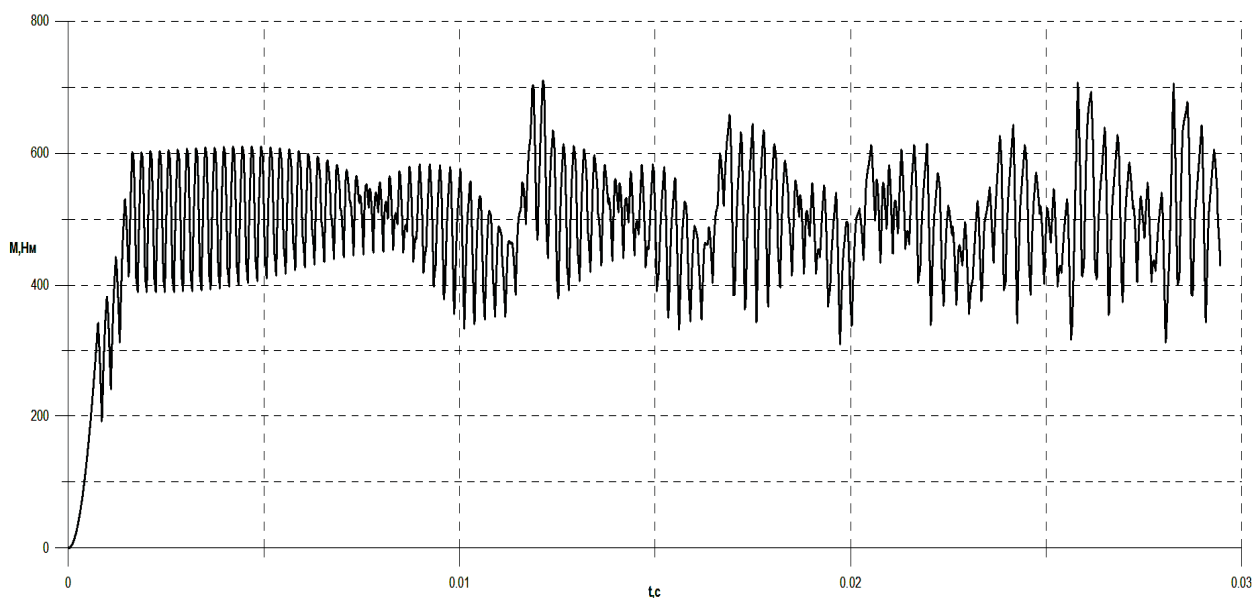


Рис. 8. Залежність моменту на валу від часу під час пуску



Рис. 9. Механічна характеристика двигуна

За результатами дослідження двигуна уточнено динамічні показники трамваю.

Висновки

Розроблено вентильний реактивний двигун з ємнісними буферами енергії для приводу коліс трамваю з низькою посадкою, механічна та регулювальні характеристики якого дозволяють йому

успішно конкурувати з тяговими колекторними двигунами, за вищої надійності і меншого об'єму активної частини.

Проектування двигуна проведено в модернізованій для таких задач та протестованій системі проектування вентильних реактивних двигунів, яка складається з комплексу програмних модулів, кожний з яких виконує певний етап розрахунку: розрахунок геометрії машини, розрахунок обмоткових даних, розрахунок магнітного кола тощо. Інформаційне забезпечення підсистеми складається з бази даних, у яку входять характеристики намагнічення електротехнічних сталей різних марок, а також довідникова інформація, яку підсистема надає користувачу в інтерактивному діалоговому режимі роботи.

Спроекований двигун має геометричні розміри, які дозволяють монтувати його ззовні колісного візка в одному боксі разом з редуктором і гальмом та забезпечує необхідні динамічні характеристики під час рушання, розгону та руху трамваю при підйомі на заданий кут.

Двигун досліджено з використанням автоматизованої системи дослідження ВРД. Результати досліджень показують, що спроекований двигун забезпечує на горизонтальній ділянці швидкість трамваю 78 км/год, яка є дещо вищою, ніж задана проектна швидкість. Потужність, яку розвиває двигун на одиницю ваги трамваю (тону), становить 6,67 кВт/т, що приблизно є такою, як і у сучасних трамваїв-аналогів, які випускають зарубіжні та вітчизняні виробники. Розраховане прискорення при русі трамваю по рівній ділянці та повному завантаженні пасажирами становить $a=1,728 \text{ м/с}^2$ і є істотно вищим, ніж прискорення у аналогічних трамваях, яке, переважно, перебуває у межах 1,1–1,5 м/с^2 . Цей факт дозволяє стверджувати, що трамвай матиме хороші динамічні показники, тобто зможе за менший час набирати більшу швидкість, зменшуючи отже, затримки у русі. Максимальний кут нахилу, під яким трамвай зможе рухатись догори без прискорення з швидкістю 30 км/год, становить $10,4^\circ$, проти 8° , як вказано у переважній більшості технічних вимог до трамваїв.

1. Ткачук В.І. Вентильний реактивний двигун з ємнісним накопичувачем енергії // Електромашинобудування та електрообладнання. – 1999. – № 52. – С. 82–88.
2. Ткачук В., Осідач Ю. Статор електромеханічного перетворювача вентильного мотора // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1995. – № 288: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 131–134.
3. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Транзисторні комутатори з ємнісними накопичувачами енергії // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1996. – № 301: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 115–122.
4. Ткачук В.І. Підсистема комп'ютерного діалогового проектування вентильних реактивних двигунів // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1997. – № 340: Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – С. 112–120.
5. Ткачук В.І. Математична модель вентильного реактивного двигуна для середніх значень // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1997. – № 301: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 106–115.
6. Ткачук В. Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка. – 1998. – С. 180–187.
7. Бондаревский Д.И., Черток М. С., Пономарев А.А. Трамвайные вагоны РВ3-6М2 и КТМ-5М3. – М.: Изд-во «Транспорт», 1975.