

Підвищення ефективності автомобільного генератора за рахунок активного випрямлення

Двадненко В. Я.¹, Дзюбенко О. А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація. Проведено аналіз електроживлення автомобілів з системи старт-стоп. Розглянуто структуру, функції та режими роботи системи синхронного випрямлення. Проаналізовано вплив синхронного випрямлення на ефективність генератора м'якого гібридного транспортного засобу. Визначено яка з конфігурацій синхронного випрямлення та при яких умовах експлуатації є більш ефективною з точки зору економії енергії. Запропоновано систему мостового синхронного випрямлення для генератора на 48 В, автомобіля з м'якою гібридною силовою установкою. Запропоновано систему синхронного випрямлення для генератора на 12 В виконувати за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою, що дозволяє підвищити енергоефективність та економічність гібридного автомобіля.

Ключові слова: м'який гібридний автомобіль, система старт-стоп, автомобільний генератор, система активного випрямлення, трифазний мостовий випрямляч, синхронний випрямляч.

Вступ

Зростання ринку автомобільної електроніки безпосередньо пов'язане з прискоренням процесу електрифікації автомобіля і в першу чергу з впровадженням енергоємних споживачів нового типу. Провідні автомобільні компанії розпочали серійне виробництво автомобілів з новим стандартом напруги живлення 12/48В (Mild hybrid).

В даний час завершується перша фаза переходу на нову архітектуру електроживлення автомобіля. Вона характеризувалася тим, що нові споживачі та джерела живлення впроваджувалися в електромережу для підвищення економічності, безпеки автомобіля та поліпшення його споживчих властивостей. Новий етап ставить собі за мету реалізацію системного координованого проектування двигуна із системою старт-стоп, рульового управління з електропідсилювачем та електромережі, як для поліпшення характеристик автомобіля, так і для оптимізації системної ціни рішення. Це дозволить окрім задоволення зростаючих вимог щодо мінімізації викидів та підвищення економічності різко знизити темпи зростання ціни автомобіля. У рамках

вирішення цієї проблеми центральне місце, як і раніше, відведено підвищенню ефективності за рахунок низьковольтних напівпровідникових приладів, в першу чергу потужних польових транзисторів MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors).

Характерною корисною особливістю MOSFET-транзисторів є активний характер і дуже мала величина опору каналу стік-витік поблизу нульової напруги, що дозволяє за допомогою напруги затвор-витік керувати опором каналу стік-витік, як для прямої, так і для зворотної полярності напруги прикладеної до цього каналу.

Для зворотної полярності це безумовно справедливо в межах напруг характерних для прямої гілки вольт-амперної характеристики силових діодів автомобільних генераторів. Тому на основі паралельного шунтування силових діодів випрямлячів MOSFET-транзисторами з відповідним керуванням затворами забезпечується підвищення ККД випрямляча. Це відбувається за рахунок зменшення падіння напруги на відкритих діодах трифазного випрямляча. Таке технічне рішення дає тим більший приріст ККД, що

нижче напруга, яка подається на випрямляч. Такі випрямлячі також мають назву синхронні випрямлячі.

Аналіз публікацій

М'які гібридні автомобілі мають стандартну низьку напругу тягового електродвигуна і тягового акумулятора [1]. Більше того, деякі м'які гібридні автомобілі компонуються системою старт-стоп на основі посиленого стартера фірми Бош і мають напругу 12 В. Тому автори вважають актуальним підвищення ефективності випрямлячів для гібридних м'яких автомобілів.

В даний час трифазні генератори стали гальмом розвитку автомобільної електромережі та гальмом впровадження у неї нових енергоємних споживачів. Зростання потужності споживачів стримується зростанням втрат у вузлах випрямлячів, реалізованих на діодах [2], які до того є основним джерелом несправності [3]. Внаслідок цього у ряді випадків провідні виробники генераторів змушені використовувати водяне охолодження, але і при цьому не вдається реалізувати потужність генератора більше 2,2 кВт. Підвищені втрати крім обмеження потужності в електромережі опосередковано впливають і на зростання споживання палива.

Враховуючи попит на автомобілі з покращеною екологією, ринок спонукає автомобільні бренди, особливо в Європейському Союзі, Китаї та США, а також їхніх постачальників розробляти ключові компоненти електричних систем для мікрогібридів із напругою 12 В (старт-стоп) та м'яких гібридних автомобілів з бортовою мережею на 48 В. в роботі [4] представлено різні варіанти реалізації таких систем.

Одним з методів оптимізації автомобільного генератора є використання більш сучасних електронних перетворювачів [5]. В роботах [6,7] розглянуто синхронний автомобільний випрямляч, що складається з потужних MOSFET-транзисторів і драйверів затворів, що був розроблений для заміни традиційних випрямляючих діодів з метою підвищення ефективності перетворення змінного струму в постійний. Потім модулі синхронного випрямляча були інтегровані в систему генератора змінного струму, після чого ефективність перетворення змінного струму в постійний склала 97 %, а ККД генератора змінного струму склала 78 %. Синхронний ви-

прямляч пройшов випробування на надійність автомобільного рівня, включаючи випробування на циклічну зміну температури (ТСТ), випробування на навантаження прискоренням (HAST), високотемпературне зворотне зміщення (HTRB) та випробування на циклічне живлення (PCT) відповідно до стандарту АЕС-Q101 має бути адаптованим для автомобілів з системою старт-стоп 12 В та системою стартер-генератор з ременем-генератором (BSG) 48 В.

В роботі [8] представлений новий блок управління затвором для силових МОП-транзисторів, який особливо підходить для синхронних випрямлячів в автомобільних мережах 12 В для заміни неефективних кремнієвих діодів. На відміну від відомих блоків керування такими синхронними випрямлячами, заснованих на схемах компаратора або зовнішнього керування синхронізацією, запропонована схема недорога і малочутлива, оскільки складається тільки з одного операційного підсилювача та кількох пасивних компонентів на кожному МОП-транзистор. Вимірювання, проведені на прототипі синхронного випрямляча, підключеного до стандартного генератора легкового автомобіля, показали значне збільшення ефективності випрямлення, а також вищий вихідний струм генератора в порівнянні зі стандартним діодним випрямлячем. Цей синхронний випрямляч працює при струмах навантаження до 120 А та максимальній частоті обертання генератора до 15000 об/хв. Описано всю схему приводу затвора з наданням інформації про бажані властивості її компонентів. Докладно пояснено процеси перемикання представленої схеми, а також параметри, що визначають її працездатність.

Зняти ці обмеження дозволяє генератор з активним випрямленням напруги [7-9]. Вперше пристрій цього типу був застосований в автомобілі представницького класу Майбах компанії Daimler/Chrysler. На замовлення компанії Delphi компанія International Rectifier розробила перший у світі пристрій, який отримав назву AIRR (активний інтегрований регулятор напруги), що об'єднав у собі функції активного випрямляча і регулятора напруги. Силовий інвертор пристрою реалізований на низьковольтних МОП-транзисторах нового покоління компанії IR.

Різка зниження втрат у вузлі випрямляча забезпечило підвищення струму генератора більш ніж 25 %. При порівняно компактних

розмірах він розвиває струм 350 А на частоті 6000 об/хв, а при середній частоті – 200 А при максимальній температурі навколишнього середовища, і піковий струм 500 А протягом 20 с. Пристрій було реалізовано у вигляді блоку, що розташовується на корпусі генератора.

Генератори з активним випрямленням напруги повинні перекривати діапазон струмів стандартних генераторів (80...150 А) і струмів генераторів для мережі 14/42 В. Їх використання дозволить підняти енергоефективність електромережі до 5 кВт і зніме обмеження на впровадження нових енергоємних споживачів.

З метою підвищення коефіцієнта корисної дії перетворювачів змінного струму в постійний струм, розроблені та знаходять практичне застосування активні випрямлячі [5-9].

Мета та постановка задачі

Метою роботи є покращення економічних та екологічних характеристик м'якого гібридного автомобіля за рахунок застосування синхронного випрямляча в генераторі а також за рахунок двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі: проаналізува-

ти структуру, функції та режими роботи системи синхронного випрямлення; проаналізувати вплив синхронного випрямлення на ефективність генератора м'якого гібридного ТЗ; визначити найбільш ефективну конфігурацію синхронного випрямлення, з точки зору економії енергії; за-пропонувати рішення системи мостового синхронного випрямлення для генератора на 12 В та 48 В м'якого гібридного автомобіля.

Трифазний мостовий активний випрямляч

Активні випрямлячі напруги дозволяють зменшити втрати електричної енергії на прямій гілці випрямляючих діодів шляхом шунтування їх MOSFET-транзисторами з відповідним керуванням. Активні випрямлячі, що працюють в такому режимі, називаються синхронними випрямлячами, тому що транзистори відкриваються одночасно з діодами. При цьому слід зазначити, що окремі діоди не потрібні, оскільки потужні MOSFET транзистори мають вбудований антипаралельний діод, розрахований на такий же струм, як і сам транзистор.

На рис. 1 наведено схему трифазного мостового активного випрямляча

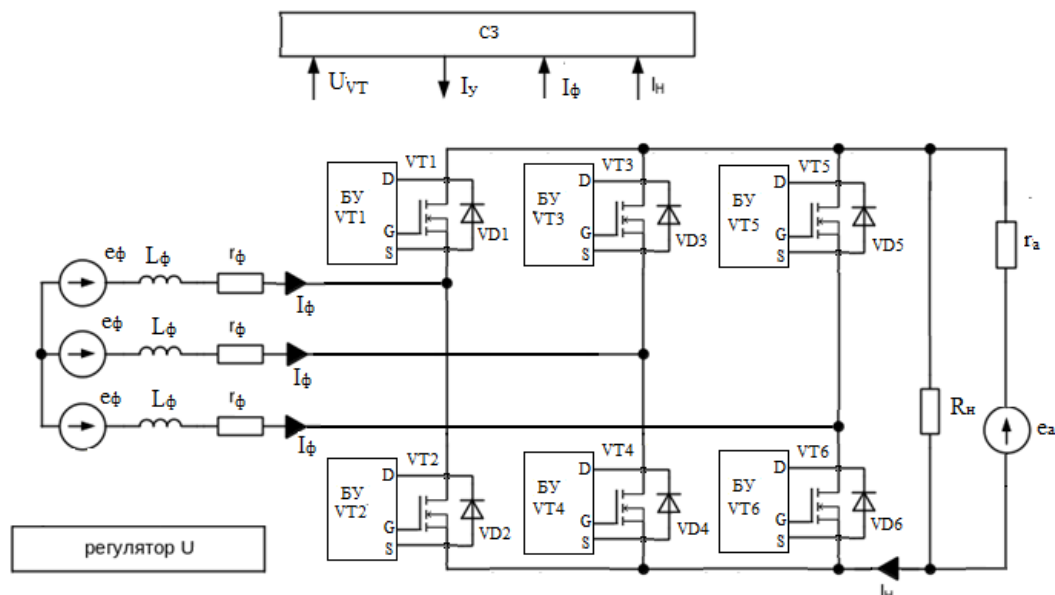


Рис. 1. Схема трифазного мостового активного випрямляча

На схемі використано позначення: БУ – блок управління; VT – MOSFET-транзистори; VD – антипаралельні діоди; СЗ – система захисту; e_ϕ , L_ϕ , r_ϕ , I_ϕ – ЕРС, індуктивність, опір і струм фази відповідно;

R_H – опір навантаження; e_a – ЕРС акумулятора, r_a – внутрішній опір акумулятора; I_H – струм навантаження; U_y – напруга стік-витік MOSFET-транзисторів; регулятор U – регулятор напруги генератора.

Для мостового синхронного випрямляча (рис. 1) як VT і VD можна застосувати MOSFET-транзистори IRFP4468PBF [10]. Блок управління синхронного випрямляча доцільно збирати на основі спеціалізованих мікросхем, таких як IR11672AS, APR343, APR348 [11,12]. Наприклад, для мостового синхронного випрямляча (рис.1) можна застосувати мікросхему IR11672AS, підключення якої для верхнього ключа мостової схеми показано на рис. 2.

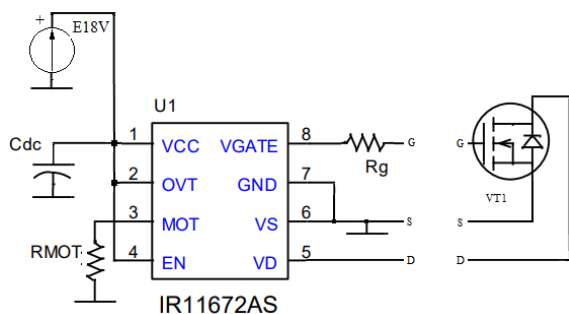


Рис. 2. Підключення IR11672AS для верхнього ключа мостової схеми

Для кожного верхнього ключа необхідний окремий, повністю гальванічно розв'язаний малопотужний джерело живлення з достатньою напругою для відкриття ключового транзистора, на рис. 2 він позначений як E18V. Конденсатор C_{dc} потрібен для блокування джерела живлення мікросхеми, номінував його кілька мікрофарад. Резистор R_g це резистор для обмеження струму затвора, значення його не критично, тому що транзистор відкривається при низькій напрузі стік-витік, зазвичай його беруть з номіналом одиниці Ом. Номінал резистора R_{MOT} впливає на мінімальний час відкритого стану транзистора що потрібно для підвищення завадозахищеності схеми. Його номінал підбирати треба під конкретний транзистор, конкретний генератор та конкретний автомобіль.

Для трьох нижніх ключів потрібне загальне малопотужне джерело живлення з мінусом на корпусі автомобіля. Напруга джерела має бути достатньою для відкриття ключового транзистора. на рис. 3 використано нульовий вивід моста генератора, що підходить для генератора на 48 В, для генератора на 12 В потрібно використовувати плюс бортової мережі 12 В. Призначення інших деталей таке ж, як і для верхніх ключів.

Розрахуємо, наскільки зменшаться втрати на ключах у разі застосування мостового синхронного випрямляча з транзисторами

IRFP4468PBF та мікросхемами IR11672AS.

Розглянемо наскільки підвищується ефективність випрямляча в генераторі на 12 В м'якого гібридного автомобіля з системою старт-стоп на основі посиленого стартера фірми Бош (конфігурація P0).

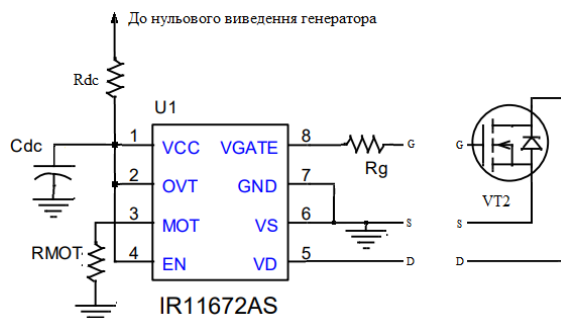


Рис. 3. Підключення IR11672AS для нижнього ключа мостової схеми

Як впливає із даних на діод у транзисторі IRFP4468PBF на ньому при струмі 180 А падає напруга 1,3 В [10]. Приблизно така напруга при такому струмі падає на діодах хороших сучасних генераторів (без синхронного випрямлення). Отже на постійному струмі 180 А діоді розсіюється потужність $180 \cdot 1,3 = 234$ Вт. Якщо мостовий випрямляч генератора видає струм 180 А (потужність генератора близько 2 кВт), то всіх діодах виділяється потужність на нагрівання $234 \cdot 2 / 3 = 156$ Вт. Це тому, що в мосту струм завжди йде через два діоди і чергуються за часом три такі пари. При синхронному випрямленні канал MOSFET підключається паралельно діоду на час, коли він пропускає струм, опір каналу стік-витік низький і практично весь струм йде через цей канал. Опір каналу стік-витік для IRFP4468PBF дорівнює 2 мОм, тому на ньому при постійному струмі падає $180 \cdot 0,002 = 0,36$ В і виділяється потужність $180 \cdot 0,36 = 64,8$ Вт. На всіх діодах випрямляча виділяється потужність нагрівання $64,8 \cdot 2/3 = 43,2$ Вт. Таким чином, більш ніж утричі зменшується нагрівання діодів.

Підвищення ККД генератора з двонапівперіодним випрямлячем із середньою точкою за рахунок активного випрямлення

Розглянемо можливість подальшого підвищення ефективності випрямляча у генераторі м'якого гібридного автомобіля. Порівняємо втрати в мостовому випрямлячі із втратами у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою (рис. 4).

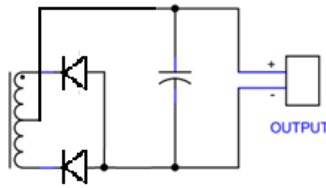


Рис. 4. Двонапівперіодний випрямляч із середньою точкою

Розглянемо це порівняння на прикладі однієї фази. Струм від генератора в двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою з випрямлячем буде:

$$I(t) = \frac{U(t) - U_d(t)}{R_H + r}, \quad (1)$$

де $U(t)$ – напруга генератора; $U_d(t)$ – напруга на відкритому діоді; R_H – опір навантаження генератора; r – опір обмотки генератора.

Струм від генератора в мостовому випрямлячі буде:

$$I(t) = \frac{U(t) - 2U_d(t)}{R_H + r}. \quad (2)$$

Врахуємо, що половину періоду в однофазному мосту струм є лише у двох діодах, а в другу половину періоду в мосту струм буде у двох інших діодах. Втрати на нагрівання чотирьох діодів мостового випрямляча за період тоді становитимуть:

$$\begin{aligned} P &= 2 \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt + 2 \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt = \\ &= 2 \int_0^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt. \end{aligned}$$

Втрати на нагрівання двох діодів у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою за період становитимуть:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt + \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt = \\ &= \int_0^T \dot{I}_d(t) \dot{U}_d(t) dt. \end{aligned}$$

У цьому випадку враховано, що половину періоду в двонапівперіодному випрямлячі із

середньою точкою струм є тільки в одному діоді, а в другу половину періоду в мосту струм буде в іншому діоді. Отже, у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою втрати на діодах у два рази менше.

У сучасних генераторах фазні обмотки мотають зазвичай джгутом, що складається з декількох ізольованих провідників. Якщо джгут складається з парного числа провідників, його можна розділити на два і тоді матимемо дві обмотки для цієї фази, або, якщо з'єднати початок однієї обмотки з кінцем іншої обмотки, отримаємо одну фазну обмотку з середньою точкою. Зробимо це для всіх трьох фаз. Тоді для кожної фази маємо обмотку, в якій опір між середньою точкою і будь-яким іншим висновком має опір $2r$ через менший у 2 рази переріз, так як у 2 рази менше число провідників.

Спочатку порахуємо енергію за період, що витрачається на нагрівання провідників з мостовим випрямлячем, підсумовуючи енергію нагріву від позитивної та негативної напівхвиль.

$$\begin{aligned} P &= r \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}^2(t)(t) dt + r \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}^2(t)(t) dt = \\ &= r \int_0^T \dot{I}^2(t)(t) dt. \end{aligned}$$

Порахуємо тепер енергію за період, що витрачається на нагрівання провідників фазної обмотки двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою, підсумовуючи енергію нагріву від позитивної та негативної напівхвиль.

$$\begin{aligned} P &= \frac{2r}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} \dot{I}^2(t)(t) dt + \frac{2r}{2} \int_{\frac{T}{2}}^T \dot{I}^2(t)(t) dt = \\ &= r \int_0^T \dot{I}^2(t)(t) dt. \end{aligned}$$

У чисельнику коефіцієнта перед інтегралом 2 тому, що в 2 рази менше провідників напівобмотці. У знаменнику 2 тому, що в першому та другому напівперіодах (позитивному та негативному напівперіодах) струм тече по різних напівобмотках, отже, за період сума енергії нагріву в кожній напівобмотці буде в 2 рази менше. Таким чином маємо од-

накове нагрівання фазних обмоток і в 2 рази менші втрати на діодах у двонапівперіодному випрямлячі із середньою точкою порівняно з мостовим випрямлячем. Однак конструкція генератора для двонапівперіодного випрямляча з середньою точкою трохи складніше, так як генератор має ту ж обмотку, але по три виводи на фазу. Кожна фаза має синхронний випрямляч, виходи яких з'єднані паралельно (з урахуванням полярності), тобто. для трифазного випрямляча потрібно три такі схеми.

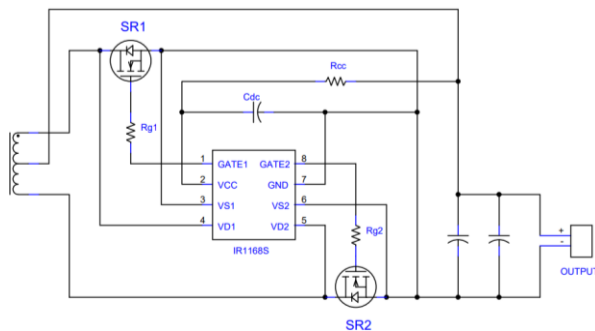


Рис. 5. Фазний випрямляч, зібраний за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою

Кожна фаза має синхронний випрямляч, зібраний за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою. Схему наведено на рис.5. У цьому синхронному випрямлячі вигідніше застосовувати мікросхему IR1168S, оскільки вона керує відразу двома транзисторами і їй не потрібні окремі ізолювані джерела живлення. Детальний опис, технічні характеристики та особливості розробки схем на інтегральній схемі IR1168S наведено у роботах [13,14].

Висновки

Проведено аналіз існуючої інформації про електропостачання автомобілів з системами старт-стоп. Розглянуто структуру, функції та режими роботи системи синхронного випрямлення.

Проаналізовано вплив синхронного випрямлення на ефективність генератора м'якого гібридного транспортного засобу. Визначено яка з конфігурацій синхронного випрямлення та при яких умовах експлуатації є більш ефективною з точки зору економії енергії.

Запропоновано варіант системи мостового синхронного випрямлення для генератора на 48 В м'якого гібридного автомобіля.

Запропоновано систему синхронного випрямлення для генератора на 12 В виконувати за схемою двонапівперіодного випрямляча із середньою точкою, що дозволяє підвищити енергоефективність та економічність автомобільного генератора.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Taoudi, A., Haque, M., Luo, C., Strzelec, A. et al. (2001). Design and Optimization of a Mild Hybrid Electric Vehicle with Energy-Efficient Longitudinal Control. *SAE Int. J. Elec. Veh.* 10 (1): 55-78, 2021. <https://doi.org/10.4271/14-10-01-0005>.
2. Sarafianos, Dimitrios & Logan, Thomas & McMahon, Richard & Flack, T.J. & Pickering, Stephen. (2014). Alternator loss breakdown and use of alternative rectifier diodes for improvement of vehicle electrical power system efficiency. 502-507. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2014.6980543>
3. Mürken, Michael & Kübel, D & Kurz, A & Thanheiser, Andreas & Gratzfeld, P. (2018). Fault analysis of automotive claw pole alternator rectifier diodes. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607641>.
4. Mild Hybrid Electric Vehicle (MHEV) – examples (2020). <https://x-engineer.org/mild-hybrid-electric-vehicles-mhev-examples/>
5. Mahmood, Omar & Wan Hasan, W. & Ismail, Luthffi & Shafie, Suhaidi & Azis, Norhafiz & Norsahperi, Nor Mohd Haziq. (2022). Optimization Approaches and Techniques for Automotive Alternators: Review Study. *Machines*. 10. 10.3390/machines10060478.
6. Chen, Jyh-Wei & Tran, Thanh Nhat Trung. (2019). Design of Low-Cost Voltage Sensing Method of Three-phase Synchronous Rectifier with High-Efficiency for Automotive Alternator. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2019.8903894>.
7. Hidaka, Yuki. (2021). Novel coupled analysis methods of automotive alternators considering synchronous rectification circuit. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-09-2020-0319>.
8. K. S. Kao et al. (2018). A high efficient synchronous rectifier for next generation automotive alternator applications. *International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)*, Mie, Japan, 2018, pp. 391-395. <https://doi.org/10.23919/ICEP.2018.8374330>.

9. Rees, Stephan & Ammann, Ulrich. (2003). A smart synchronous rectifier for 12 V automobile alternators. 1516 - 1521 vol.4. <https://doi.org/10.1109/PESC.2003.1217684>.
10. International Rectifier. (2018). HEXFET Power MOSFET: IRFP4468PBF. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRFP4468-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153562c73472019
11. Diodes Incorporated. (2021). Secondary side synchronous rectification controller. APR348, Document number: DS42016 Rev. 5 - 2. <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/APR348.pdf>
12. International Rectifier. (2013). Advanced smartrectifier™ control IC: IR11672AS. <https://www.infineon.com/dgdl/ir11672aspdf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c455561653>
13. International Rectifier. (2011). Dual smart rectifier driver IC: IR1168S. <https://www.infineon.com/dgdl/ir1168.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c467fa1658>
14. Adnaan Lokhandwala. (2016). Design of Secondary-Side Rectification using IR1168 Dual SmartRectifier™ Control IC. Application Note AN-1139. International Rectifier. <https://www.infineon.com/dgdl/an-1139.pdf?fileId=5546d462533600a40153559a0fd1f10d9>

Двадненко Володимир Яковлевич¹, д.т.н., проф. кафедри автомобільної електроніки, dvadnenkovladimir@gmail.com, тел. +38 067-733-04-41, ORCID: 0000-0002-6634-3431

Дзюбенко Олександр Андрійович¹, к.т.н., доц. кафедра автомобільної електроніки, тел. +38 066-768-41-16, dzyubenko.alan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0387-4956

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Increasing the efficiency of the automotive generator due to active rectification

Abstract. Problem. *Increasing fuel economy requirements for modern vehicles lead to an increase in their electrification. The rise in the number of electrical systems leads to a higher load on the electrical power supply system, with the vehicle's power load reaching 2-3 kW. Leading automobile companies have begun serial production of vehicles with the new 12/48 V power supply voltage standard. The traditional alternator used today is a synchronous alternator, and rectifier diodes are used*

*to convert the generated AC to DC to charge the battery, which is inefficient. A study of losses in an automobile alternator shows that the diode rectifier creates a significant portion of the machine's losses at low speeds, resulting in increased fuel consumption. The solution to this problem is to use a synchronous rectifier to replace traditional rectifier diodes, thus improving the efficiency of the AC/DC rectifier. **Goal:** To improve the economic and environmental characteristics of a mild hybrid vehicle through the use of a synchronous two-semi-periodic rectifier with a midpoint in the car generator. **Methodology:** Analytical methods are used to calculate energy losses on diodes and in the phase windings of the generator when employing a two-semiperiod rectifier with a midpoint, compared to a bridge rectifier. **Results:** The structure, functions, and operation modes of the synchronous rectification system are considered. The effect of synchronous rectification on the generator efficiency of a mild hybrid vehicle is analyzed. It was determined which configurations of synchronous rectification are more effective from the standpoint of energy saving and under which operating conditions. It was determined that in a two-semiperiod rectifier with a midpoint, compared to a bridge rectifier, there will be the same heating of the phase windings and 2 times fewer losses on the diodes. **Practical value:** A version of the bridge synchronous rectification system of the 48 V generator for a mild hybrid vehicle using MOSFET transistors and specialized control IC is proposed. A synchronous rectification system and its circuit implementation for a 12 V generator based on a two-semi-periodic rectifier scheme with a midpoint is proposed, which allows increasing the energy efficiency and economy of the automobile generator.*

Key words: *mild hybrid electric vehicle, start-stop system, automotive generator, active rectifier system, three-phase bridge rectifier, synchronous rectifier.*

Dvadnenko Volodymir¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 067-733-04-41, dvadnenkovladimir@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6634-3431

Dzyubenko Oleksandr¹, Ph.D., Assoc. Prof. Vehicle Electronics Department, tel. +38 066-768-41-16, dzyubenko.alan@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0387-4956

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.