



ZF KLÁŠTEREC (2): JAK VZNIKÁ VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA

V minulém vydání jsme představili proměnu kláštereckého závodu ZF a jeho strategickou roli v oblasti výkonové elektroniky. V tomto pokračování se podíváme přímo do výrobních hal a krok za krokem projdeme celý proces její výroby.

Průvodcem nám byl jednatel společnosti Tomáš Michal. Už během prvních zastavení na výrobní lince bylo zřejmé, že jeho znalosti zdaleka nekončí u řízení společnosti – jednotlivé výrobní operace dokázal podrobně vysvětlit včetně jejich technologických souvislostí a návaznosti na celý výrobní proces (obr. 8).

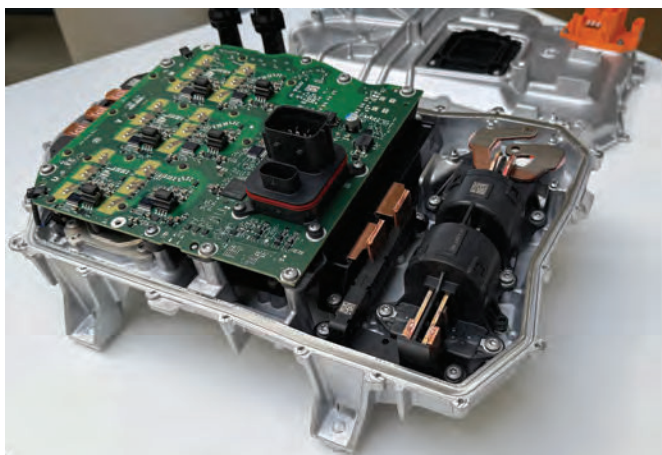
Než se vydáme do provozu, stojí za to stručně vysvětlit, co vlastně výkonová elektronika v elektromobilu zajišťuje a proč patří mezi technologicky nejsložitější součásti elektrifikovaného pohonu.

Srdce elektrického pohonu

Výkonová elektronika je rozhraním mezi trakčním akumulátorem a elektromotorem (obr. 9). Jejím hlavním úkolem je řídit tok elektrické energie



8 Tomáš Michal během exkurze vysvětluje výrobu nové generace výkonové elektroniky.



9 V Klášterci nad Ohří vzniká kompletní výkonová elektronika.

a pomocí výkonových polovodičů přeměňovat stejnosměrné napětí z akumulátoru na třífázové střídavé napětí pro elektromotor. Při rekuperačním brzdění probíhá tento proces opačně – výkonová elektronika přeměňuje elektrickou energii vznikající v elektromotoru zpět na stejnosměrné napětí, které se následně ukládá v akumulátoru ve formě elektrické energie.

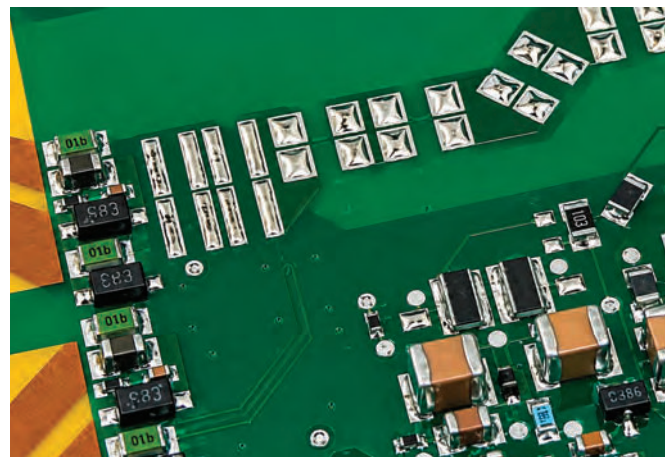
Účinnost této přeměny významně ovlivňuje spotřebu elektrické energie, dojezd vozidla, jízdní dynamiku i rychlost nabíjení. Nejnovější generace výkonové elektroniky proto využívá výkonové polovodiče z karbidu křemíku (SiC), které ve srovnání s klasickými křemíkovými součástkami vykazují podstatně nižší spínací ztráty, vyšší účinnost a umožňují využití moderní 800V architektury. Právě výroba těchto systémů je dnes jednou z hlavních specializací klášterického závodu.

Čistota na prvním místě

Citlivé výkonové polovodiče i další elektronické součástky vyžadují dokonale čisté prostředí a důslednou ochranu před elektrostatickým výbojem (ESD), který může elektroniku nevratně poškodit. Ochrana proto nezačíná až u výrobní linky, ale již před vstupem do výrobních prostor.

Každý zaměstnanec i návštěvník si musí nejprve nasadit ochrannou síťku na vlasy. Muži s delšími vousy či knírem si navíc nasazují samostatnou síťku pro vousy, přezdívanou „vousenka“. Důvod je prostý – i jediný vlas nebo vous představuje nežádoucí kontaminaci, která může ovlivnit kvalitu technologických procesů, například lepení, lakování nebo utěsnění elektronického modulu. V prostředí, kde se vyrábějí elektronické systémy s projektovanou životností mnoha let, proto není pro podobná rizika žádný prostor. Další součástí vstupní procedury jsou speciální modré návleky na obuv vybavené vodivým páskem, přezdívaným „cancourek“, který musí být v přímém kontaktu s pokůzkou, aby bylo zajištěno spolehlivé uzemnění.

Posledním bodem je kontrola uzemnění. Každý se postaví na vyznačené místo, přiloží ruce na kontaktní plochy



10 Takto vypadá deska plošných spojů po průchodu pracovištěm SMT.

a měřicí stanice během několika okamžiků ověří elektrický odpor celého uzemňovacího systému. Teprve po úspěšném testu a rozsvícení zeleného světla se odemkne vstupní turniket a je možné vstoupit do výroby.

Po průchodu turniketem je na první pohled zřejmé, že čistota výrobního prostředí není ponechána náhodě. Výrobní haly jsou klimatizované, s přesně řízenou teplotou a vlhkostí, řízené proudění vzduchu omezuje pronikání prachových částic a autonomní mobilní roboti průběžně udržují podlahy v čistotě. Hned po vstupu do výrobní haly jsme měli také pracovníky úklidu se speciálními vysavači, kteří průběžně odstraňovali i ty nejmenší nečistoty v okolí výrobních linek. Udržování čistoty zde totiž představuje stejně důležitou součást výrobního procesu jako samotná výroba.

Osazování desek plošných spojů

Linka začíná pracovištěm SMT (surface mount technology), kde vzniká základ celé výkonové elektroniky. Právě zde se na desky plošných spojů osazují miniaturní elektronické součástky s přesností, která se počítá na desetiny milimetru (obr. 10). Na holou desku se nejprve pomocí přesné kovové šablony nanese letovací pasta. Poté nastupují vysokorychlostní osazovací automaty, které během několika sekund umístí na desku rezistory, kondenzátory, integrované obvody i další elektronické součástky.

Každou operaci průběžně kontrolují kamerové systémy, které porovnávají skutečnou polohu součástek s výrobní dokumentací. Jakmile jsou všechny komponenty osazeny, putuje deska do přetavovací (reflow) pece, kde se letovací pasta roztaví a vytvoří trvalé elektrické spoje.

Ani zde však kontrola nekončí. Na výstupu z pece následuje automatická optická kontrola (AOI). Pokud si systém některým spojem není zcela jistý, zobrazí jeho detail na monitoru operátora, který provede konečné posouzení. Kombinace automatické kontroly a lidského rozhodování umožňuje odhalit i velmi drobné odchylky, které by mohly ovlivnit dlouhodobou spolehlivost elektronického modulu (obr. 11).



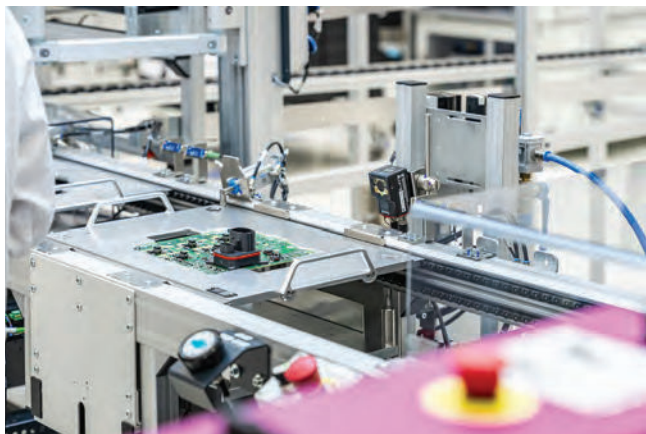
11 Během exkurze jsme si mohli prohlédnout systém optické kontroly výrobního procesu.

Ochranné lakování prodlužuje životnost

Teprve po úspěšném dokončení optické kontroly může modul pokračovat na další pracoviště, kde získá ochranu proti vlhkosti, vibracím i dalším vlivům automobilového provozu. Z tohoto důvodu se na desky nanáší speciální ochranný lak, který obsahuje fluorescenční přísadu pro následnou kontrolu pod UV osvětlením. Kamerový systém tak přesně ověří, zda ochranná vrstva pokrývá všechna předepsaná místa a nikde nechýbí ani nepřesahuje požadovaný rozsah. Po nanesení ochranné vrstvy prochází modul vytvrzovací pecí, kde lak získá konečné mechanické i chemické vlastnosti a vytvoří odolnou ochranu elektronických obvodů.

Rentgen kontroluje spoje

Na dalším pracovišti se ručně osazuje nízkonapěťový (LV) konektor, jehož vývody se s deskou propojí metodou selektivního letování (obr. 12). Na rozdíl od klasického vlnového letování se zde každý pin pájí samostatně přesně odměřeným množstvím roztavené pájky. Díky tomu lze minimalizovat tepelné namáhání okolních součástek a současně dosáhnout velmi vysoké přesnosti spoje. Kvalitu letovaných spojů následně ověřuje rentgenová kontrola, která zkontroluje i skrytá místa uvnitř konektorů. Sleduje se především správné zaplnění otvorů pájkou po celé délce pinu, protože právě tyto spoje musí při provozu vozidla odolávat vibracím i tepelnému namáhání.



12 Výkonová elektronika po ručním osazení LV konektoru.

Finální montáž

Po dokončení elektronické části výroby pokračuje modul na finální montáž, kde postupně získává svou výslednou podobu. Zde se spojuje deska plošných spojů s mechanickými díly a vzniká kompletní výkonová elektronika připravená pro další výrobní operace. Modul se usazuje do hliníkového krytu (housingu), který nejen zajišťuje mechanickou ochranu, ale současně slouží i jako součást systému chlazení. Dále se montují chladicí kanály a další konstrukční prvky.

Veškeré šroubované spoje se průběžně kontrolují elektroniky řízenými utahovacími systémy. Ty sledují nejen předepsaný utahovací moment, ale také úhel dotažení i dráhu každého šroubu. Právě zde jsme si všimli dalšího zajímavého detailu – používané šroubovací přípravky současně fungují jako ochranné masky, které zabraňují pádu šroubů do elektronického modulu. U takto složitých zařízení by totiž i drobný kovový předmět ponechaný uvnitř mohl později způsobit závažnou poruchu.

Nakonec následuje nanesení těsnicí hmoty. Aby dokonale přilnula k hliníkovému krytu, je jeho povrch předem mechanicky upraven broušením. Poté proběhne zkouška těsnosti, při níž se modul natlakuje vzduchem a systém sleduje případný pokles tlaku.

Laser spojuje to nejdůležitější

Jedním z technologicky nejzajímavějších pracovišť celé výrobní linky je robotická buňka pro laserové svařování. Právě zde se vytvářejí spoje, kterými budou při provozu vozidla procházet vysoké proudy, proto musí každý svar splňovat mimořádně přísné požadavky. Uvnitř uzavřené buňky provádí průmyslový robot během několika okamžiků desítky přesně definovaných svarů. Každý z nich průběžně sleduje systém LPM (laser power monitor), který vyhodnocuje výkon laseru, odraz paprsku i průběh samotného svařování. Z naměřených údajů dokáže určit, zda svar dosáhl požadované velikosti, hloubky i teplotního profilu.

Současně probíhá kamerová kontrola svarů. Kombinace optického systému a průběžného monitorování laserového procesu umožňuje odhalit i minimální odchylky ještě během samotného svařování. Kvalita těchto spojů přitom



13 Závěrečné automatické testování ověřuje správnou funkci celého kompletu.

patří mezi rozhodující předpoklady dlouhodobé spolehlivosti celého modulu.

Rozhoduje testování

Po dokončení všech montážních operací nastává nejdelší část výrobního cyklu – testování. Přestože samotná výroba působí velmi složitě, právě kontrola kvality zabírá více než polovinu celkového času výroby.

Každý modul postupně absolvuje sérii elektrických i funkčních zkoušek. Součástí jsou nízkonapěťové i vysokonapěťové testy, při nichž se ověřuje správná funkce jednotlivých obvodů i jejich elektrická pevnost při provozním napětí nové generace výkonové elektroniky (obr. 13). Během testování řídicí systém průběžně vyhodnocuje stovky elektrických i funkčních parametrů. Jakákoli odchylka mimo předepsané tolerance znamená okamžité vyřazení modulu z výroby. Teprve po úspěšném dokončení všech zkoušek následuje nahrání řídicího softwaru, který umožňuje komunikaci s ostatními systémy vozidla.

QR kód jako digitální životopis

Úplným závěrem výrobního procesu je vytištění identifikačního štítku s QR kódem. Na první pohled jde o běžné výrobní označení, ve skutečnosti však představuje digitální „životopis“ každého vyrobeného modulu. QR kód umožňuje dohledat kompletní historii jeho výroby – od použitých komponentů a jejich výrobní historie přes nastavení jednotlivých výrobních operací až po výsledky všech provedených testů (obr. 14). Díky této digitální stopě lze i po mnoha letech přesně identifikovat původ každé součástky i celý průběh výroby konkrétního kusu. V případě jakékoli reklamace nebo technického problému je možné okamžitě identifikovat výrobní šarži i všechny související výrobní údaje.

Každých 40 sekund

Během exkurze zazněl údaj, který může být na první pohled matoucí. Samotná výrobní linka pracuje v taktu 28 sekund, zatímco kompletní výkonová elektronika opouští výrobu každých 40 sekund. Vysvětlení je poměrně jedno-



14 Označení modulu QR kódem.

duché. Některé technologické operace, například laserové svařování nebo závěrečné testování, trvají déle než základní takt linky. Aby výroba neztrácela plynulost, jsou tato pracoviště zdvojená, a pracují tedy paralelně. Díky tomu zůstává celý výrobní tok vyvážený a každých čtyřicet sekund opouští linku jeden kompletně vyrobený a otestovaný modul (obr. 15).

Logistika bez hranic



15 Finální výrobek ve speciálním obalu připravený k přesunu do expedičního oddělení.

Přestože většina technologicky nejnáročnějších operací probíhá přímo v Klášterci nad Ohří, výslednou efektivitu výroby významně ovlivňuje také logistika.

Řada klíčových komponentů se stále dováží z Asie, odkud putují po moři, někdy tři až čtyři měsíce. Takto dlouhé dodací lhůty vyžadují vysoké skladové zásoby a současně zvyšují citlivost výroby na geopolitické události nebo výpadky v dopravě. Není proto překvapením, že pracovníci ZF během exkurze označili současnou situaci s nadsázkou za „logistický cirkus“.

Společnost ZF proto systematicky rozšiřuje síť evropských dodavatelů a hledá možnosti lokalizace výroby. Cílem není pouze zkrácení dodavatelských řetězců, ale také vyšší flexibilita, nižší skladové zásoby a větší odolnost výroby vůči budoucím výkyvům na světových trzích.

Závěr

Při odchodu z výrobní haly je zřejmé, že výroba výkonové elektroniky dnes zdaleka nepředstavuje pouze montáž elektronických součástek. Stejně důležitou roli jako špičkové technologie zde hrají čistota prostředí, důsledná kontrola kvality, vysoká míra automatizace i zkušenosti zaměstnanců. Právě spojení těchto faktorů umožňuje, aby z klášterického závodu každých čtyřicet sekund odjížděl modul určený pro nejmodernější elektrifikované pohony. ■