Analiza cieplna modułu projektora — podsumowanie

Wynik: w warunkach laboratoryjnych UN R149 (23 °C) temperatura złącza diod nie przekracza 98 °C. W najgorszym przypadku postoju (S4) złącze osiąga 146 °C: poniżej granicy bezwzględnej 150 °C, ale powyżej celu projektowego 135 °C. Sterownik musi więc ograniczać prąd według czujnika NTC na płytce mijania — z redukcją (S7) złącze ma 130 °C.

Scenariusz	P mij. [W]	P drog. [W]	Q wewn. [W]	T pow. wewn.	T radiatora	T pod LED mij./drog.	Tj mijania	Tj drogowe	ocena
S1: mijania + pozycyjne, laboratorium 23 °C (warunki UN R149)	9,6	0,0	8,8	30 °C	46–51 °C	51 / 50 °C	70 °C	—	w celu
S2: mijania + drogowe + pozycyjne, laboratorium 23 °C	9,6	12,3	19,6	39 °C	63–74 °C	74 / 74 °C	92 °C	98 °C	w celu
S3: mijania + pozycyjne, postój: przód 40 °C, komora silnika 80 °C	9,6	0,0	8,8	77 °C	94–99 °C	99 / 98 °C	118 °C	—	w celu
S4: mijania + drogowe + kierunkowskaz, postój: 40 / 80 °C	9,6	12,3	23,2	88 °C	111–122 °C	122 / 122 °C	140 °C	146 °C	poniżej granicy
S5: mijania + drogowe, jazda: 35 / 60 °C	9,6	12,3	19,6	69 °C	93–104 °C	103 / 104 °C	122 °C	128 °C	w celu
S6: światła dzienne, postój: 40 / 80 °C	0,0	0,0	3,2	72 °C	81–81 °C	81 / 81 °C	—	—	—
S7: jak S4, z redukcją prądu przez sterownik (mijania 85 %, drogowe 70 %)	8,2	8,6	18,7	85 °C	105–113 °C	113 / 113 °C	129 °C	130 °C	w celu

Wnioski konstrukcyjne

- Radiator z 8 żebrami o podziałce 10,0 mm (szczelina 8,0 mm) pracuje w zamkniętej obudowie bez wentylatora. Przy szczelinie poniżej ok. 6 mm konwekcja naturalna między żebrami zanika — pierwotny układ 11 żeber co 6,2 mm odrzucono.
- Wymagana czarna powłoka radiatora (emisyjność ≥ 0,85): promieniowanie odprowadza w S4 porównywalną część ciepła co konwekcja (h_prom ≈ 9,9 W/m²K, h_konw ≈ 3,2 W/m²K).
- Wymaganie dla sterownika LED: czujnik NTC na płytce mijania, redukcja prądu od 118 °C (mijania do 85 %, drogowe do 70 %). Bez redukcji zapas do granicy 150 °C w S4 wynosi tylko 4,2 K.
- Sterownik pod obudową: straty 3,7 W, temperatura obudowy sterownika ok. 91 °C przy otoczeniu 80 °C (granica 105 °C).
- Temperatura ściany obudowy z PP-TD40 w S4: ok. 83 °C (dopuszczalna praca ciągła 110 °C). Ramka i odbłyśniki z PC-HT mają zapas (Vicat ≥ 180 °C).

Model, założenia i sprawdzenie solwera

- Przewodzenie w radiatorze: metoda objętości skończonych na siatce 1,0 mm (134 382 komórek aluminium, λ = 130 W/(m·K)), stan ustalony, solwer gradientów sprzężonych.
- Źródła ciepła: 70 % mocy elektrycznej diod (sprawność promienista 30 % wg karty katalogowej) rozłożone na polach płytek 20 × 18 mm po obu stronach języka.
- Powierzchnie: konwekcja naturalna między żebrami (Bar-Cohen i Rohsenow), ściany swobodne (Churchill–Chu), promieniowanie z powierzchni widzących obudowę (ε = 0,85).
- Obudowa: model jednostrefowy. Ciepło wewnętrzne (diody, 60 % mocy promienistej pochłonięte w lampie, DRL, kierunkowskaz) odpływa przez klosz PC 3 mm i ściany PP 2,5 mm. Przy radiatorze przyjęto powietrze cieplejsze o 8 K (rozwarstwienie).
- Złącze: Tj = T pod płytką + Q · (R materiału termoprzewodzącego 0,10 + R dielektryka IMS 1,5 + Rth złącze–pole lutownicze maks. 1,20) = T + Q · 2,80 K/W.
- Sprawdzenie solwera: żebro proste 40 × 2 × 20 mm z podstawą izotermiczną. Strumień ciepła z kodu 1,5374 W, wzór analityczny (tanh mL) 1,5374 W, różnica -0,001 %.

Granice ważności

- Model obudowy jest jednostrefowy. Rzeczywisty rozkład temperatury powietrza w lampie (rozwarstwienie, cyrkulacja) wymaga obliczeń CFD albo pomiaru termoparami — niepewność temperatury złącza szacuję na ±10 K.
- Temperatury otoczenia 40 / 80 °C (przód / komora silnika) to założenie; obowiązują wartości ze specyfikacji producenta pojazdu.
- Nie liczono obciążenia słonecznego (skupienie światła słonecznego przez soczewkę na oprawie i odbłyśnikach) — pozycja w DFMEA z wymaganą próbą.



