

## Biała Księga

Instrukcje dla projektantów, instalatorów  
oraz rzeczoznawców ds. zabezpieczeń ppoż.



**Chłodzenie aktywne  
a chłodzenie pasywne.  
Dlaczego aktywne chłodzenie  
jest lepszą technologią dla  
elektroniki energetycznej?**

## Spis treści

<b>Wprowadzenie</b> .....	<b>4</b>
Definicja chłodzenia pasywnego .....	4
Definicja chłodzenia aktywnego .....	4
<b>Planowanie i projektowanie systemu</b> .....	<b>5</b>
Aktywne chłodzenie oznacza większą elastyczność .....	5
Elastyczność w projektowaniu systemu .....	5
Elastyczność instalacji .....	7
<b>Konserwacja</b> .....	<b>8</b>
Aktywne chłodzenie zmniejsza koszty .....	9
<b>Żywotność</b> .....	<b>10</b>
Dłuższa żywotność dzięki aktywnemu chłodzeniu .....	11
Żywotność wentylatorów .....	11
<b>Uzyski</b> .....	<b>13</b>
Aktywne chłodzenie oznacza wyższą wydajność .....	13
Konsekwencje, na przykładzie systemu testowego (referencyjnego) .....	14
<b>Porównanie termiczne</b> .....	<b>16</b>
Zachowanie pasywnie chłodzonych urządzeń .....	16
Zachowanie aktywnie chłodzonych urządzeń .....	18
<b>Aspekty dwóch układów chłodzenia</b> .....	<b>19</b>
Aspekty technologii aktywnego chłodzenia .....	19
Poziomy hałasu .....	19
Niższe koszty w całym okresie użytkowania produktu .....	19
Niższa waga oznacza większą wygodę .....	19
Dłuższa żywotność .....	19
Większa elastyczność w projektowaniu systemu .....	20
Wyższa wydajność .....	20
Aspekty technologii pasywnego chłodzenia .....	20
Poziom hałasu .....	20
Wydajność .....	20

<b>Dalszy rozwój aktywnego chłodzenia .....</b>	<b>21</b>
Fronius GEN24 Plus oraz GEN24 .....	21
Zachowanie przepływu powietrza w radiatorze Fronius GEN24 Plus oraz GEN24 .....	22
Wkład w efektywną produkcję energii .....	22
<b>Podsumowanie .....</b>	<b>23</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>23</b>

Biała księga

© Fronius International GmbH

Wersja 1.2, 09/2023, Jürgen Wolfahrt, Franz Breitwieser, Volker Haider, Jasmin Gross

Solar Energy

Firma Fronius zastrzega sobie wszelkie prawa, w szczególności prawo do powielania, dystrybucji i tłumaczenia. Żadna część tego dokumentu nie może być w jakiegokolwiek formie: przechowywana, przetwarzana, powielana lub rozpowszechniana za pomocą systemów elektronicznych bez pisemnej zgody firmy Fronius.

Informacje publikowane w niniejszym dokumencie, pomimo największej staranności w jego przygotowaniu, mogą ulec zmianie i ani autor, ani Fronius nie mogą przyjąć żadnej odpowiedzialności prawnej. Sformułowanie dotyczące płci odnosi się w równym stopniu do formy męskiej i żeńskiej.

# Wprowadzenie

Wysokie temperatury otoczenia nie tylko wpływają na wydajność całego systemu fotowoltaicznego, ale mają również znaczący wpływ na żywotność falowników. Wysokie temperatury otoczenia wpływają negatywnie nie tylko na pracę falowników, ale także na wydajność i żywotność elementów elektronicznych wewnątrz urządzenia.

Pytanie brzmi więc, jak zatrzymać przegrzewanie komponentów elektronicznych bez inwestowania ogromnych sum pieniędzy, na przykład w klimatyzowane pomieszczenie dla falownika.

W niniejszej książce szczegółowo przeanalizowano i porównano dwie standardowe technologie chłodzenia falownika dostępne na rynku. Testy porównawcze mają na celu podkreślenie różnic i korzystnych cech technologii pasywnego oraz aktywnego chłodzenia.

## Definicja chłodzenia pasywnego

Technologia pasywnego chłodzenia opiera się na naturalnej konwekcji. Duże radiatory służą do utrzymywania niskiej temperatury wewnętrznej, co powoduje, że urządzenie ma duże gabaryty i jest ciężkie.

## Definicja chłodzenia aktywnego

Celem technologii aktywnego chłodzenia jest proaktywne i kontrolowane odbieranie energii cieplnej poprzez zastosowanie wewnętrznych i/lub zewnętrznych wentylatorów.

W firmie Fronius chłodzenie aktywne (*ang. Active Cooling*), zwane też chłodzeniem z wymuszonym obiegiem powietrza jest standardem technologicznym we wszystkich urządzeniach. Oprócz małego radiatora wewnątrz falowników znajduje się wentylator zapewniający cyrkulację powietrza, co zapobiega powstawaniu tzw. gorących punktów (*ang. hot-spots*, nazwa nieprzypadkowo zbieżna z niepożądanym efektem występującym w modułach fotowoltaicznych). Kolejny wentylator jest odpowiedzialny za utrzymywanie żeber radiatora elektroniki mocy w niskiej temperaturze. Prędkość obrotów wentylatora zmienia się w zależności od temperatury wewnątrz urządzenia.

# Planowanie i projektowanie systemu

Inteligentny projekt systemu jest szczególnie ważną kwestią w przypadku domów jednorodzinnych, ponieważ po pierwsze: dachy domów często mają nieregularny kształt i są zorientowane w różne strony świata, a po drugie: powierzchnia dachu jest ograniczona.

W praktyce istnieje również ograniczony wybór miejsca instalacji falownika: instalator musi dostosować się do istniejących warunków w budynku. A niektórzy producenci falowników podają surowe zapisy dotyczące rodzaju, położenia i miejsca instalacji. Ograniczenia te są zwykle spowodowane przez system chłodzenia zastosowany w falowniku.

## Aktywne chłodzenie oznacza większą elastyczność

### Elastyczność w projektowaniu systemu

Jeśli przyjrzymy się bliżej maksymalnemu prądowi wejściowemu ( $I_{DCmax}$ ) urządzenia śledzącego MPP dla pasywnie chłodzonych urządzeń, odkryjemy, że ich elastyczność jest ograniczona. Ze względu na często ograniczone natężenie prądu trackera MPP dla pasywnie chłodzonych urządzeń, do trackera można zwykle podłączyć tylko jeden łańcuch modułów. Wynika to z faktu, że wyższe natężenia powodują również wyższe temperatury elementów ( $P = I^2 \cdot R$ ).

Urządzenia chłodzone pasywnie wykorzystują równomiernie podzielone wejścia MPPT. Z powodu ograniczonej możliwości rozpraszania ciepła, natężenia prądów wejściowych MPPT również są ograniczone. Powoduje to mniejszą elastyczność projektowania, ponieważ do jednego wejścia MPPT można podłączyć mniejszą ilość łańcuchów modułów. Jest to również powód, dla którego asymetryczna dystrybucja energii pomiędzy MPP trackery jest możliwa tylko w ograniczonym zakresie.

Z drugiej strony urządzenia chłodzone aktywnie mogą rozpraszać więcej ciepła, co przekłada się na wyższe natężenia prądu. Z kolei wyższe natężenia na tracker MPP oznaczają większą elastyczność w projektowaniu systemu, ponieważ można podłączyć więcej równoległych łańcuchów.

Aktywnie chłodzone urządzenia Fronius pozwalają na wyjątkowo wysokie prądy (np. 25 A dla 5 kW Symo GEN24 Plus oraz GEN24) z co najmniej jednym wejściem MPPT. To pozwala na podłączenie dwóch lub więcej łańcuchów modułów do jednego wejścia MPPT. Dodatkowo aktywnie chłodzone falowniki Fronius mają

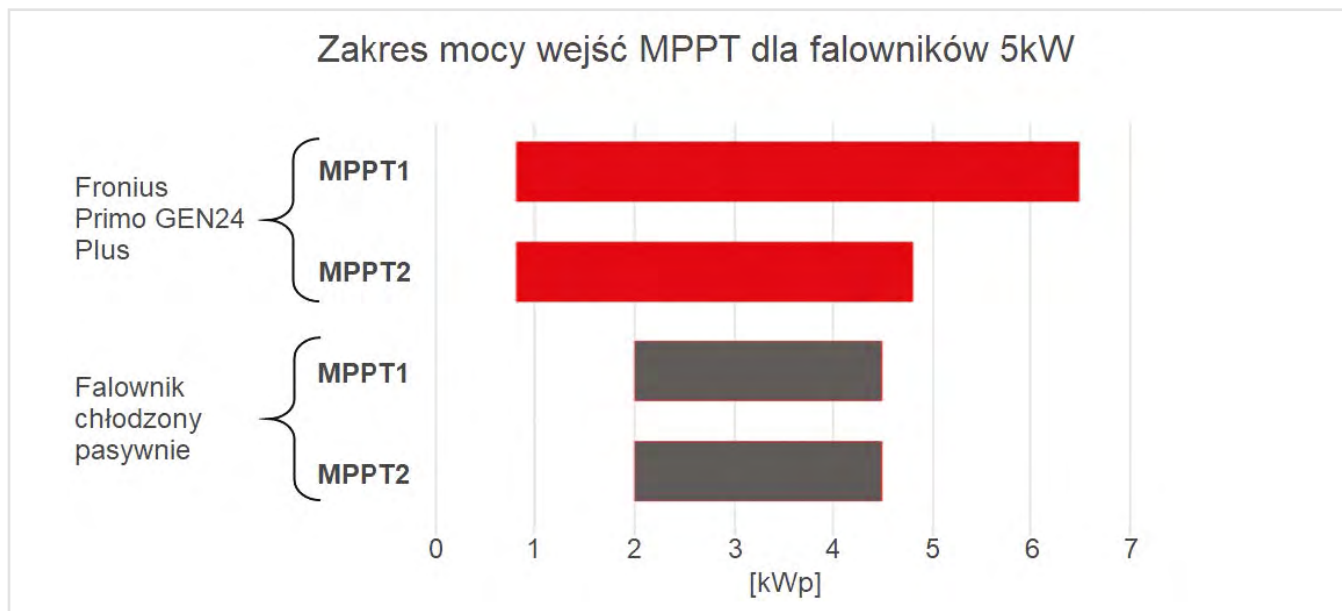
co najmniej jeszcze jedno wejście MPPT. Dzięki temu możliwe jest dowolnie asymetryczne rozmieszczenie łańcuchów na dwóch wejściach MPPT. To, wraz z możliwym przewymiarowaniem mocy modułów względem mocy falownika nawet o 150%, pozwala na większą elastyczność w projektowaniu systemu. Dlatego rozwiązanie to nazywa się **SuperFlex Design**. Można to zilustrować prostym przykładem.

**Przykład porównawczy:**

Dane systemu		
Moc wyjściowa (AC)	Przewymiarowanie	Moc modułu
5 kW	130% (6,6 kWp)	330 watt (9,97 A)

Dzięki aktywnie chłodzonemu falownikowi Fronius w naszym przykładowym systemie nie ma problemu z podłączeniem obu łańcuchów modułów do jednego wejścia MPPT. Możliwe byłoby również podłączenie dodatkowych modułów z dachu o innym nachyleniu lub azymucie do drugiego wejścia MPPT.

Łącząc SuperFlex Design z aktywnym systemem chłodzenia, falowniki Fronius umożliwiają stworzenie idealnego projektu dla dachów o różnym stopniu złożoności. Z drugiej strony w przypadku pasywnie chłodzonych urządzeń często przydzielany jest stosunkowo symetryczny rozkład generatora fotowoltaicznego, co widać na poniższej grafice.



**Rysunek 1:** Porównanie rozkładu mocy trackera MPP dla pasywnie i aktywnie chłodzonych falowników 5 kW

Oczywiste jest, że rozkład mocy urządzeń śledzących MPP w przypadku urządzeń chłodzonych aktywnie jest znacznie większy niż w przypadku urządzeń chłodzonych pasywnie. Dla odmiany, falowniki z pasywnym chłodzeniem w kategorii mocy 5 kW zwykle dopuszczają prądy maksymalne od 10 A do 15 A.

W stosunku do naszego przykładowego systemu, oznacza to, że w przypadku urządzeń chłodzonych pasywnie maksymalny rozkład asymetryczny jest ograniczony do 4,6 kW (MPPT1) i 2,0 kW (MPPT2), natomiast w przypadku aktywnie chłodzonego falownika Fronius rozkład asymetryczny można zrealizować przykładowo jako 5,7 kW (MPPT1) i 0,9 kW (MPPT2).

W systemie ze standardowym modułem słonecznym o mocy 330 W (LG 330N1K), który ma prąd  $I_{mmp@25^{\circ}C} = 9,69$  A, falowniki Fronius umożliwiają podłączenie ciągu o długości od 3 do 22 modułów słonecznych do MPPT 1 i od 3 do 20 modułów słonecznych do MPPT 2. Z drugiej strony w pasywnie chłodzonym urządzeniu można podłączyć tylko 7 do 15 modułów fotowoltaicznych do każdego z MPP trackerów.

## Elastyczność instalacji

W przypadku pasywnie chłodzonych falowników powietrze musi napływać i wypływać tak swobodnie, jak to tylko możliwe, co wymusza określoną pozycję montażu falownika.

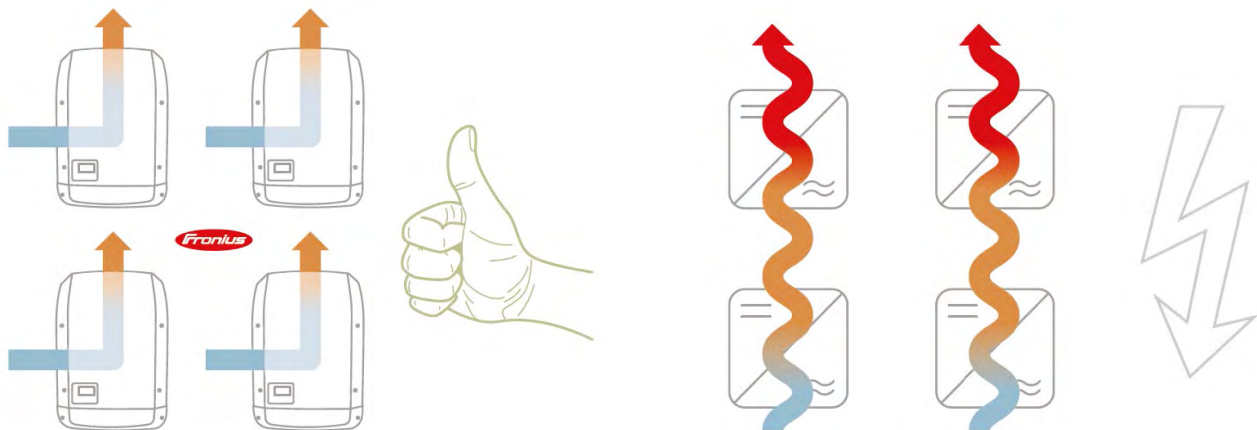
Falowniki z pasywnym systemem chłodzenia można montować tylko pionowo (90°). Istnieją również ograniczenia dotyczące instalacji falowników obok siebie (zwiększony dystans) lub jednego nad drugim, ponieważ w przeciwnym razie nagrzane powietrze przemieszcza się od urządzenia do urządzenia, co znacznie zmniejsza efekt chłodzenia. Nie zaleca się również montażu falownika w bezpośrednim świetle słonecznym, ponieważ urządzenie oprócz temperatury otoczenia będzie dodatkowo ogrzewane przez promieniowanie słoneczne.

Nie ma ograniczeń instalacyjnych dla urządzeń z aktywnym systemem chłodzenia. Falowniki można montować pionowo lub poziomo (0° – 90°), co szczególnie przydaje się przy montażu „na płasko”, np. bezpośrednio na powierzchni dachu.



**Rysunek 2:** Elastyczne opcje montażu dla aktywnie chłodzonych falowników Fronius [źródło: Fronius]

Dzięki inteligentnemu, aktywnemu obiegowi powietrza możliwe jest montowanie falowników obok siebie. Na przykład chłodne powietrze jest zasysane z boku, a ogrzane powietrze jest rozpraszane do góry, jak pokazano na schemacie na następnej stronie.



**Rysunek 3:** Elastyczny montaż – aktywny i inteligentny obieg powietrza umożliwia montaż falowników obok siebie a nawet jeden nad drugim [źródło: Fronius]

Kontrolowana i wymuszona konwekcja pozwala na około **pięciokrotne zwiększenie rozpraszania ciepła** w porównaniu z konwekcją pasywną, co oznacza, że falowniki można również umieścić w miejscach o wyższym poziomie nasłonecznienia.

## Konserwacja

Konserwacja jest elementem każdej usługi serwisowej określonej przepisami technicznymi lub instrukcjami producenta. Jest wymagana, aby zapewnić, że urządzenie pozostanie sprawne. Konserwacja jest zazwyczaj przeprowadzana w regularnych odstępach czasu, tak zwanych interwałach konserwacji. Zwykle muszą to robić wykwalifikowani technicy. „Bezobsługowy” oznacza, że nie ma określonych okresów pomiędzy przeglądami. W przypadku pasywnego układu chłodzenia nagromadzony kurz i brud należy usuwać w zalecanych odstępach czasu. Jeśli ta przewidziana konserwacja nie zostanie wykonana, będzie to miało negatywny wpływ na gwarancję urządzenia. Poniższa lista wymaganych przeglądów pokazuje, jaką formę takie wymagania mogą przyjąć (patrz rysunek 4 poniżej).

Zgodnie z listą serwisową tego producenta różne czynniki, takie jak czystość radiatora, stan pracy systemu, połączenia kablowe i zacisk uziemienia muszą być sprawdzane dwa razy w roku, ponieważ pasywny układ chłodzenia wymaga częstej konserwacji. Powoduje to wysokie bieżące koszty konserwacji, szczególnie w zapyłonym otoczeniu.



Check Item	Check Method	Maintenance Interval
System cleaning	Check periodically that the heat sink is free from dust and blockage. Turn off the DC switch and then turn it on at night to clean the oxide off the switch.	6 months to annually.
System running status	Check that the SUN2000 is not damaged or deformed. Check for normal sound emitted during operation of the SUN2000. Check that all SUN2000 parameter settings are correctly set during operation.	6 months
Electrical Connections	Check that cables are securely connected. Check that cables are intact and the parts in contact with a metallic surface are not scratched. Check that the idle RS485 and USB ports are covered by waterproof caps.	6 months
Grounding reliability	Check that PGND cables are securely connected.	6 months

**Rysunek 4:** Okres pomiędzy przeglądami [źródło: HUAWEI Operating Instructions numer 07, 2018-05-04]

Jeżeli, co zwykle ma miejsce, do oczyszczenia żeber chłodzących pasywnego układu chłodzenia wymagany jest również wykwalifikowany technik, dodatkowo zwiększa to koszty konserwacji (patrz rysunek poniżej). Jeżeli konserwacja nie zostanie przeprowadzona przez specjalistę zgodnie z zaleceniami, wpłynie to negatywnie na gwarancję.

8003

### **⚠ QUALIFIED PERSON**

#### **Active power limited derating**

The inverter has reduced its power output for more than ten minutes due to excessive temperature.

#### **Corrective measures:**

- Clean the cooling fins on the rear of the enclosure and the air ducts on the top using a soft brush.
- Ensure that the inverter has sufficient ventilation.
- Ensure that the ambient temperature +40°C has not been exceeded.
- Ensure that the inverter is not exposed to direct solar irradiation.

**Rysunek 5:** Wymagana specjalistyczna konserwacja

[źródło: SMA Operating Instructions, SB30-50-1AV-40-BE-de-10]

## Aktywne chłodzenie zmniejsza koszty

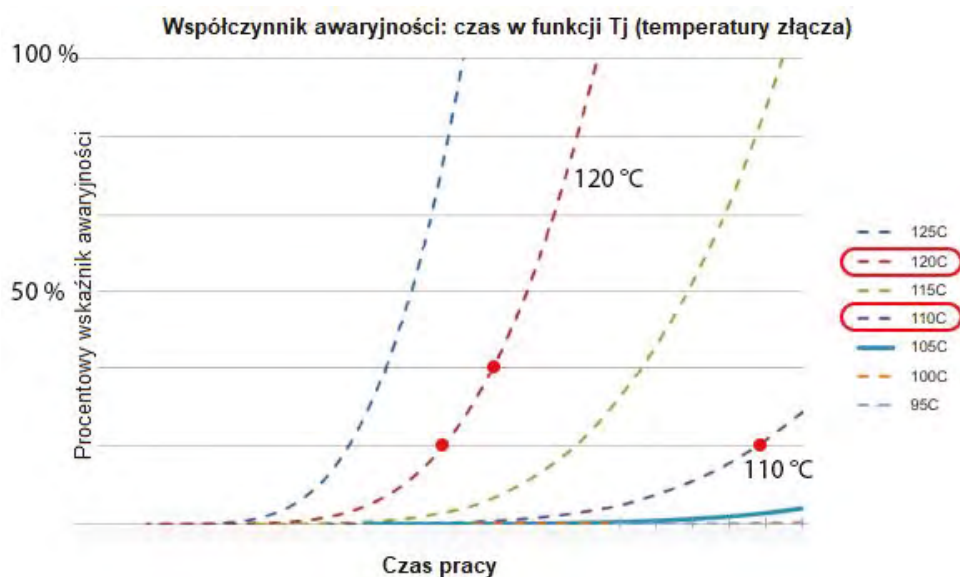
Falownik z aktywnym układem chłodzenia jest zwykle bezobsługowy, więc bieżące koszty są zauważalnie zmniejszone.

Niemniej jednak, regularne kontrole elementów układu chłodzenia są również zalecane w przypadku falowników z aktywnym układem chłodzenia. Szczególnie w bardzo zapyłonym otoczeniu zalecane są kontrole coroczne. Nie wymagana jest jednak konserwacja, więc wykwalifikowany technik nie jest potrzebny, co ponownie obniża koszty.

## Żywotność

Niezawodność falowników jest często wyrażana przez wartości MTBF (*ang. Mean Time Between Failures*), czyli oczekiwany czas działania między dwoma kolejnymi awariami. Jest to wartość wyliczana matematycznie bazując na wskaźniku uszkodzeń danego elementu, określonym w testach laboratoryjnych lub podczas krótkich okresów pracy. Przykładowo można postawić wymaganie dla użycia falownika w określonych warunkach (np. 4000 godzin pracy rocznie przez 10 lat). Jednak te obliczone wartości zwykle znacznie różnią się od rzeczywistych wskaźników awaryjności.

Tak zwany wskaźnik FIT (*ang. Failure in Time* – ilość błędów w czasie) jest bardziej informacyjny, ale można go ustalić tylko w dłuższym okresie eksploatacji (np. powyżej 10 lat). Fronius działa w branży falowników fotowoltaicznych od ponad 25 lat i dlatego może korzystać ze wskaźnika FIT (patrz punkt Żywotność wentylatorów). A przecież żywotność elementów elektronicznych jest silnie zależna od temperatury. Im bardziej nagrzane są te komponenty, tym krótszy jest oczekiwany okres użytkowania i wyższe prawdopodobieństwo awarii. Często cytowaną zasadą niezawodności kondensatorów w elektronice jest to, że **każdy wzrost temperatury o 10 °C z grubszą zmniejsza o połowę ich żywotność** (patrz Texas Instruments [1]). Rysunek 6 wykorzystuje półprzewodnik elektroniczny jako przykład do pokazania wskaźnika awaryjności w zależności od okresu działania i temperatury.



Rysunek 6: Wskaźnik awaryjności zależy od temperatury i czasu działania [źródło: Texas Instruments [1]]

To wyraźnie pokazuje, że dla elementów narażonych przez dłuższy czas na ekstremalne temperatury wskaźnik awaryjności zwiększa się drastycznie, a żywotność znacznie się skraca. Porównując wskaźnik awaryjności przy wzroście temperatury od 110 °C do 120 °C, oczywiste jest, że żywotność jest o połowę mniejsza.

## Dłuższa żywotność dzięki aktywnemu chłodzeniu

Przy aktywnym chłodzeniu elementy elektroniczne pracują w niższej temperaturze, a zatem są mniej obciążone, co z kolei prowadzi do dłuższej żywotności.

Doświadczenie pokazuje, że wyższe temperatury mogą prowadzić do lokalnych gorących punktów (*ang. hot-spots*) w falownikach z pasywnym chłodzeniem, więc żywotność tych urządzeń zostanie zmniejszona.

Aby zapobiec przegrzewaniu elementów elektronicznych, falownik dokonuje kontrolowanej redukcji mocy wyjściowej, znanej jako „obniżanie wartości mocy znamionowej” (*ang. power derating*). W przypadku urządzeń pasywnie chłodzonych obniżenie mocy zaczyna się wcześniej niż w przypadku urządzeń chłodzonych aktywnie, co niewątpliwie prowadzi do strat w wydajności (patrz rozdział 5).

## Żywotność wentylatorów

Efekt chłodzenia jest większy w przypadku aktywnie chłodzonych falowników. Dzieje się tak, ponieważ używa się wentylatorów.

Dzięki pasywnie chłodzonym falownikom osiąga się prędkości przepływu do około 1 m/s, zależnie od różnicy temperatur między elementem chłodzącym a otoczeniem oraz od długości radiatora. Porównując to z aktywnie chłodzonymi falownikami, w których ze względu na zwiększoną konwekcję wymuszoną przez wentylator osiąga się około 5 m/s, co przekłada się na 5 razy większe rozpraszanie ciepła. Oznacza to, że elementy mogą być chłodzone szybciej, co z kolei wydłuża żywotność komponentów elektronicznych.

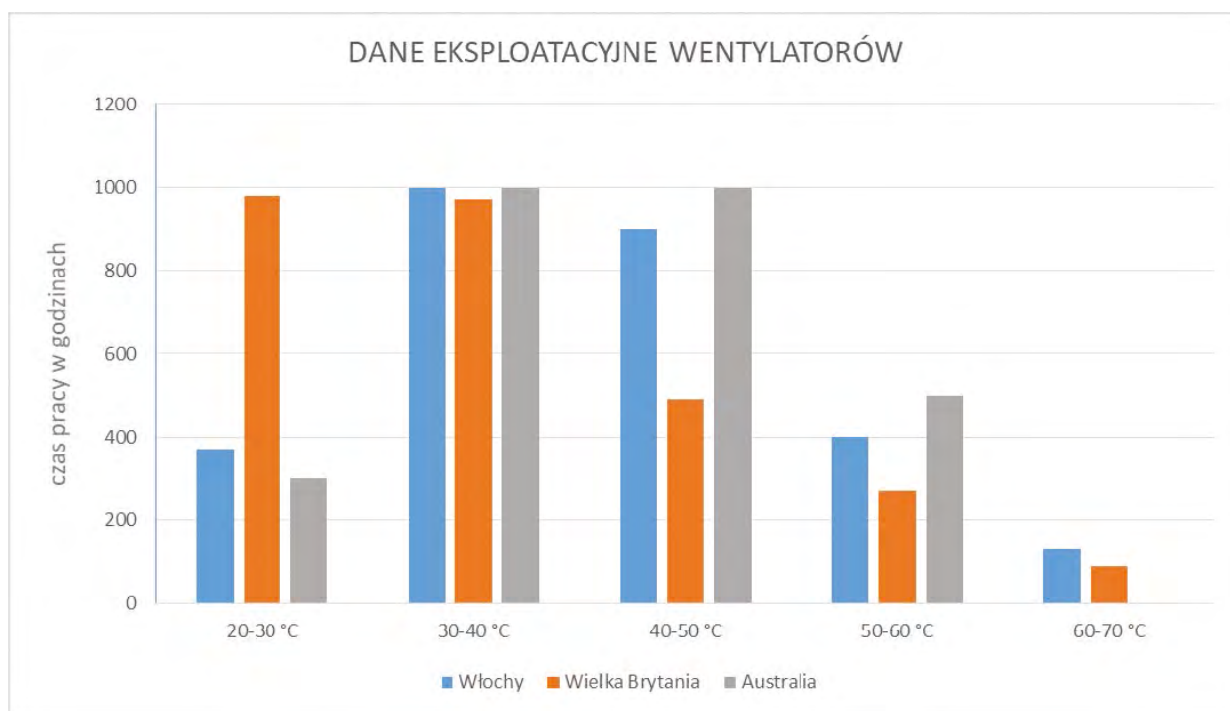
Wentylatory stosowane w urządzeniu Fronius do aktywnego chłodzenia zostały zaprojektowane na okres użytkowania wynoszący co najmniej 20 lat, co potwierdzają następujące źródła danych:

Dane dostawcy: specyfikacja żywotności > 80 000 godz. obowiązuje dla pracy przy napięciu nominalnym. Jednak wentylatory zwykle działają przy obniżonym napięciu (niższej prędkości), co poprawia żywotność. Testy trwałości komponentów i systemu: w firmie Fronius urządzenia były testowane pod ciągłym obciąże-

niem przez ponad 15 000 godzin w laboratorium, co w praktyce oznacza ponad 20 lat działalności u klienta. Przy okazji: testy w branży elektronicznej zwykle trwają do 1000 godzin.

Dane gwarancyjne Fronius: falownik Fronius IG Plus (z zainstalowanymi maksymalnie 6 wentylatorami) działa w terenie od ponad 10 lat. Całkowita liczba awarii wentylatorów wynosi  $< 0,1\%$  wszystkich sprzedanych urządzeń. Przekłada się to na niezawodność elementu  $< 10$  FIT (awaria w czasie), co odnosząc do ok.  $< 1\%$  całkowitego FIT wszystkich komponentów, wskazuje, że jest to doskonały wynik.

Rysunek 7 poniżej pokazuje rzeczywiste dane operacyjne z dwóch urządzeń narażonych na ekstremalnie wysokie temperatury przez okres jednego roku. Godziny pracy wentylatora są podzielone na kategorie według 5 kategorii temperatury otoczenia w krokach co  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $20\text{-}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{-}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50\text{-}60\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $60\text{-}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



**Rysunek 7:** Roczne dane operacyjne dla wentylatorów aktywnie chłodzonych urządzeń w Australii, Włoszech i Wielkiej Brytanii [źródło: Fronius]

Zasada działania wentylatorów o kontrolowanej prędkości w urządzeniach z aktywnym układem chłodzenia Fronius jest taka, że **pracują z pełną prędkością tylko wtedy, gdy temperatura otoczenia osiągnie  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$** . Ale w praktyce ten punkt pracy - jak pokazano na wykresie - występuje tylko przez kilka godzin w roku. Przez pozostały czas pracy w roku wentylatory pracują z mniejszą prędkością.

Można również zauważyć, że w Australii wentylatory nigdy nie pracują z pełną prędkością w ciągu roku. Kontrola ponad 350 systemów wykazała, że w szczególnie gorących regionach, takich jak Australia, nagrzane moduły

fotowoltaiczne mają tak zmniejszoną moc PV, że falownik (a zatem również wentylator) nigdy nie pracuje z pełną mocą wyjściową. Wentylatory falowników zlokalizowanych w regionach położonych dalej na północ wykazują wyższe prędkości w ciągu roku.

Tak więc w praktyce łatwo jest osiągnąć znacznie więcej godzin pracy niż na przykład 80 000 godzin określone przez producenta wentylatora, które zostały obliczone przy stałej pełnej prędkości.

## Uzyski

Jeśli falownik jest wystawiony na działanie wysokich temperatur, moc wyjściowa jest zmniejszana (*ang. derating* - obniżanie wartości mocy znamionowej), aby zatrzymać przegrzewanie elementów elektronicznych. Jednak, jak już wspomniano na początku, ma to negatywny wpływ na wydajność instalacji fotowoltaicznej.

Obniżanie parametrów wyjściowych w falownikach z aktywnym chłodzeniem nie ma aż tak negatywnego wpływu. Zaczynają one bowiem obniżać moc wyjściową w wyższych temperaturach otoczenia. To dlatego, że efekt chłodzenia jest znacznie bardziej skuteczny niż w przypadku falowników chłodzonych pasywnie. Falowniki z pasywnym chłodzeniem działają w trybie obniżania mocy wyjściowej w niższych temperaturach otoczenia i dlatego są mniej odpowiednie do ciepłego klimatu, ponieważ oczekuje się, że wydajność instalacji może być znacznie zmniejszona (patrz sekcja 5.1.1).

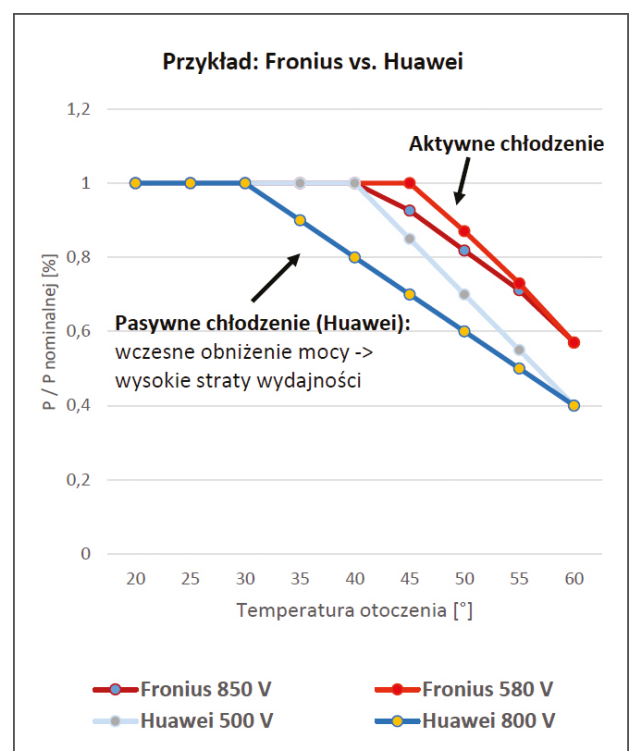
## Aktywne chłodzenie oznacza wyższą wydajność

Te falowniki, które mają aktywny układ chłodzenia, mogą pracować dłużej przy pełnej mocy znamionowej, a zatem osiągać wyższe wydajności. Jest to wyraźnie widoczne na poniższej ilustracji, która porównuje falownik Fronius z aktywnym układem chłodzenia do falownika z pasywnym układem chłodzenia przy różnych napięciach po stronie DC.

### Rysunek 8: Redukcja mocy falownika

w odniesieniu do temperatury otoczenia

[źródło: karta katalogowa firmy konkurencyjnej]

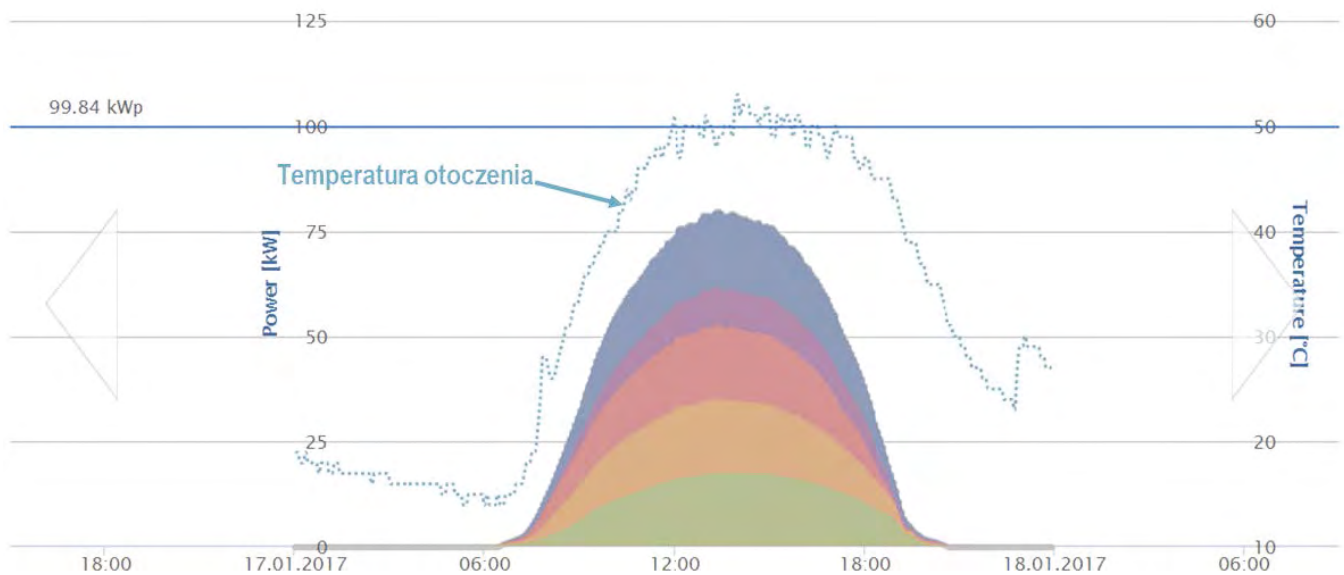


Jak widać na grafice, pasywnie chłodzony falownik („Huawei 800 V”) przechodzi w tryb obniżania mocy już w temperaturach otoczenia 30 °C, co może powodować wysokie straty wydajności. Z kolei aktywnie chłodzony falownik („Fronius 850 V”) zaczyna obniżać moc dopiero od 40 °C. Dla porównania falownik chłodzony pasywnie **działa już tylko na 80% mocy wyjściowej** w tej temperaturze otoczenia!

## Konsekwencje, na przykładzie systemu testowego (referencyjnego)

Wpływ wczesnego obniżenia mocy w pasywnie chłodzonych urządzeniach jest analizowany poniżej na podstawie systemu zainstalowanego w Australii.

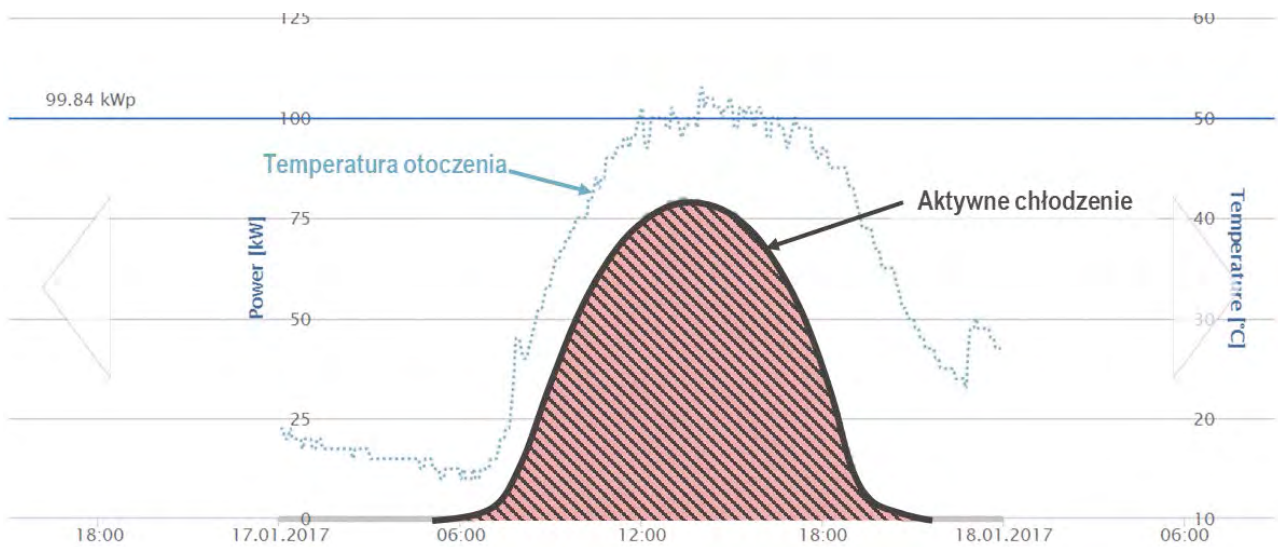
Ten system referencyjny (99,84 kWp DC / 90,0 kW AC) z aktywnie chłodzonymi falownikami Fronius został zainstalowany w Australii. Poniższy schemat pokazuje dzienną krzywą produkcji mocy wyjściowej (po stronie prądu przemiennego) i wykres temperatury otoczenia. W tym australijskim systemie testowym występują temperatury otoczenia dochodzące do 50 °C.



**Rysunek 9:** Dzienna krzywa wydajności i wykres temperatury otoczenia

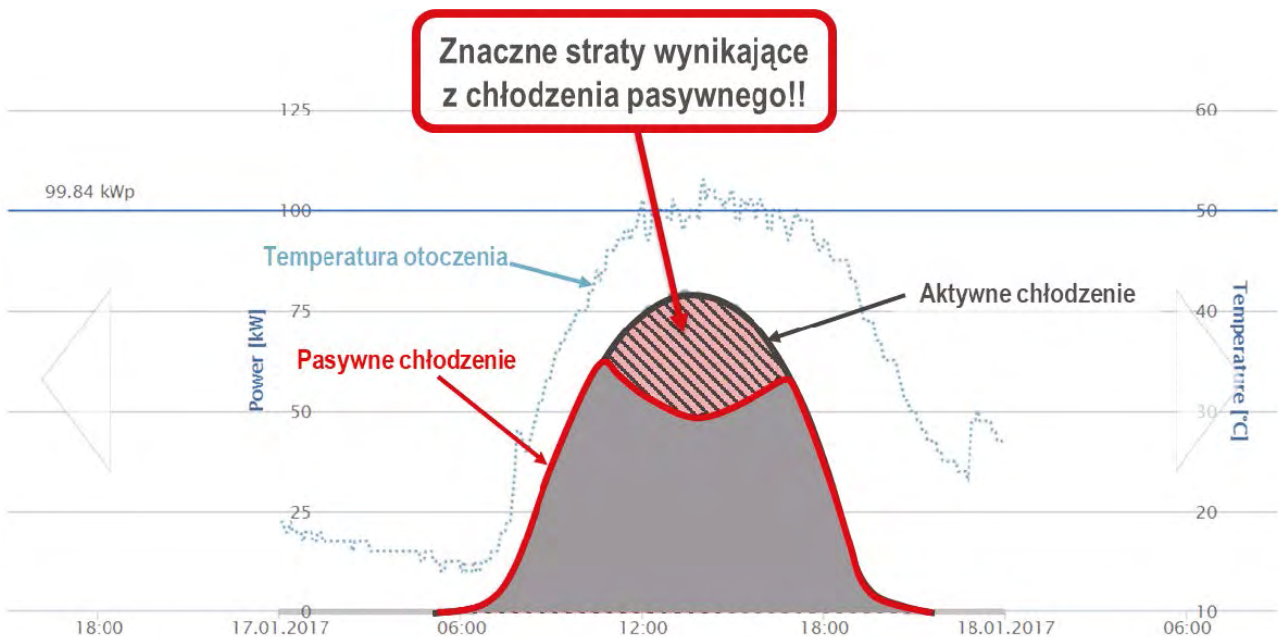
[źródło: System referencyjny w Australii (99,84 kWp DC / 90,0 kW AC), Fronius [3]]

W tych warunkach temperaturowych aktywnie chłodzone falowniki Fronius mogą osiągnąć uzysk 647 kWh, co pojawia się na poniższej grafice jako zakreskowany obszar poniżej czarnej krzywej:



**Rysunek 10:** Wydajność przy aktywnym chłodzeniu [źródło: System referencyjny w Australii, Fronius [3]]

Aby dokonać porównania z pasywnie chłodzonymi urządzeniami w tych samych warunkach, do tego samego systemu zostało przeniesione obniżenie wartości mocy znamionowej urządzenia konkurencyjnego, wg wykresu przedstawionego w poprzedniej sekcji.



**Rysunek 11:** Należy oczekiwać spadku wydajności lub straty przy chłodzeniu pasywnym

[źródło: System referencyjny w Australii, Fronius [3]]

Rys. 11 pokazuje wydajność, której można się spodziewać, gdyby ten system został wdrożony z falownikiem z pasywnym chłodzeniem. Zakładając, że obniżenie mocy zaczyna się w temperaturze ok. 35 °C, uzyski byłyby możliwe na poziomie jedynie 551 kWh.

Obliczone straty z chłodzeniem pasywnym wyniosłyby około 96 kWh (zakreskowany obszar), co odpowiada utracie wydajności o 15%.

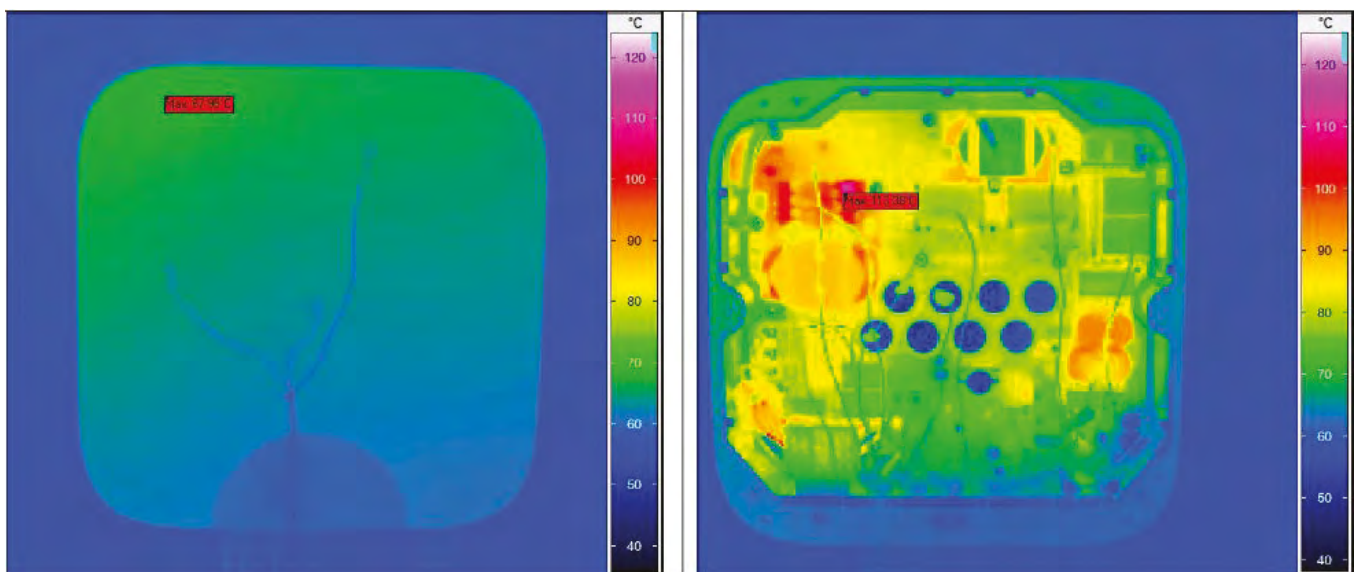
## Porównanie termiczne

Układ chłodzenia falownika jest niezbędny, szczególnie dla elementów elektronicznych wewnątrz urządzenia. Jeśli wewnątrz urządzenia zrobi się zbyt gorąco, może to mieć szkodliwe konsekwencje dla poszczególnych komponentów, co z kolei wpłynie na żywotność i wydajność całego urządzenia.

Aby porównać efekt technologii pasywnego i aktywnego chłodzenia, wykonano porównawcze pomiary temperatury pasywnie chłodzonych falowników (innych niż Fronius) i aktywnie chłodzonych falowników (Fronius). Wyniki zostały następnie porównane.

## Zachowanie pasywnie chłodzonych urządzeń

Na poniższym zdjęciu zastosowano kamerę termowizyjną, aby pokazać rozkład temperatury wewnątrz pasywnie chłodzonego urządzenia w temperaturze otoczenia 55 °C. W tych warunkach element elektroniczny w pasywnie chłodzonym urządzeniu ma już temperaturę 113 °C. Jednak zgodnie ze specyfikacjami producenta tego komponentu, jego maksymalna dopuszczalna temperatura wynosi 110 °C.



**Rysunek 12:** Dystrybucja ciepła w pasywnie chłodzonym falowniku w temperaturze otoczenia 55 °C ( $P_{AC} = 5$  kW,  $U_{mpp} = 260$  V) [źródło: Fronius]



Temperatura 112 °C została zmierzona na elemencie elektronicznym w pasywnie chłodzonym falowniku o tej samej kategorii mocy innego producenta dla temperatury otoczenia 35-45 °C (w zależności od napięcia prądu stałego), jak to zostało przedstawione na rysunku 13 na kolejnej stronie.

Chociaż w tym urządzeniu jest zainstalowany wewnętrzny wentylator, jego wymiary są zbyt małe, ponieważ wewnątrz obudowy występują różnice temperatur dochodzące do 40 °C. Istnieje zatem ryzyko lokalnych gorących punktów, które mogą mieć negatywny wpływ na żywotność falownika.



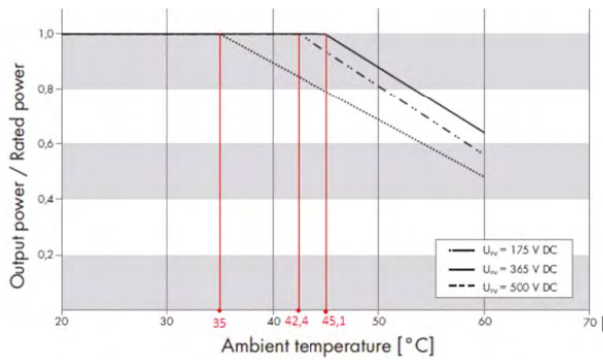
**Rysunek 13:** Wykres temperatury otoczenia i mocy wyjściowej dla pasywnie chłodzonego falownika ( $P_{AC} = 5 \text{ kW}$ ,  $U_{mpp,min} = 175 \text{ V}$ ) [źródło: pomiary Fronius]

Jak widać na wykresie, obniżenie mocy zaczyna się od temperatury otoczenia 35 °C. W temperaturze otoczenia 55 °C pozwala to na obniżenie temperatury komponentu (dławika DC) do 106 °C. Ale moc w tym momencie nadal wynosi tylko 60% mocy nominalnej (patrz zielona krzywa wydajności na rysunku 13).

Pomiary termiczne wykazały, że punkty rozpoczęcia obniżania mocy różnią się w zależności od napięcia stałego w różnych temperaturach otoczenia:

- 35-40 °C (175 V DC)
- 45-50 °C (365 V DC)
- 45-50 °C (500 V DC)

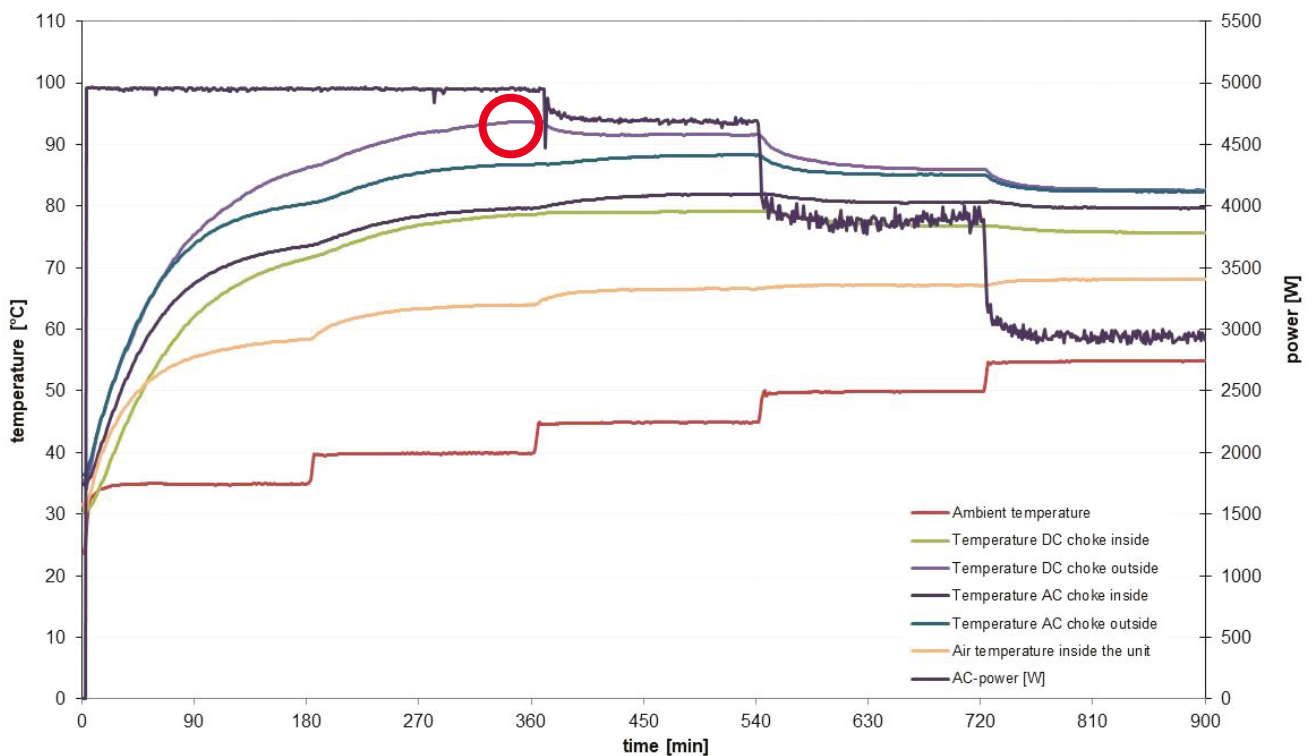
Wyniki pomiarów są zgodne ze specyfikacjami producenta:



**Rysunek 14:** Obniżenie mocy zależne od temperatury otoczenia przy  $P_{AC,nom} = 5 \text{ kW}$  [źródło: karta danych technicznych firmy konkurencyjnej]

## Zachowanie aktywnie chłodzonych urządzeń

Pomiary temperatury elementów wykonano również dla aktywnie chłodzonego falownika Fronius, tej samej kategorii mocy co urządzenia chłodzone pasywnie, w temperaturze otoczenia do  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . W przypadku aktywnie chłodzonych urządzeń maksymalna temperatura elementu wynosi  $94 \text{ }^\circ\text{C}$ , czyli o  $19 \text{ }^\circ\text{C}$  mniej, a więc wyraźnie poniżej maksymalnej dopuszczalnej temperatury elementu wynoszącej  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  (dławik DC).



**Rysunek 15:** Wykres temperatury otoczenia i mocy wyjściowej dla aktywnie chłodzonego falownika Fronius

( $P_{AC} = 5 \text{ kW}$ ,  $U_{mpp} = 220 \text{ V}$ ) [źródło: Pomiary Fronius]

Jak widać z rysunku, chociaż falownik Fronius również obniża moc w temperaturze  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ , to pasywnie chłodzony falownik traci swoją żywotność z powodu wyższych temperatur komponentów. Jak wyjaśniono w rozdziale 4, wzrost temperatury o  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  oznacza skrócenie żywotności o 50%.

# Aspekty dwóch układów chłodzenia

## Aspekty technologii aktywnego chłodzenia

### Poziomy hałas

Aktywnie chłodzone falowniki mają w urządzeniu więcej wentylatorów niż falowniki pasywnie chłodzone, co może powodować wyższy poziom hałasu. Pomiary rzeczywistych systemów pokazują, że wentylatory technologii aktywnego chłodzenia pracują z pełną prędkością przez około 10% całego czasu pracy, nawet w wysokich temperaturach otoczenia (patrz punkt Żywotność wentylatorów).

Są jednak zalety posiadania tych wentylatorów w aktywnie chłodzonym falowniku, jak wyjaśniono w dalszej części.

### Niższe koszty w całym okresie użytkowania produktu

Falowniki z aktywną technologią chłodzenia - jak wyszczególniono w rozdziale 3 - zwykle nie wymagają konserwacji. To ogranicza OPEX (wydatki operacyjne) do minimum. Z drugiej strony w przypadku falowników z pasywnym systemem chłodzenia koszty konserwacji są wysokie. Coraz częściej wymagane są sześciomiesięczne okresy konserwacji, szczególnie w bardzo zapyłonym otoczeniu. Bieżące koszty utrzymania systemów z pasywnym chłodzeniem są zatem znacznie wyższe niż w przypadku urządzeń z chłodzeniem aktywnym.

### Niższa waga oznacza większą wygodę

Falowniki z technologią aktywnego chłodzenia są zawsze lżejsze niż te z chłodzeniem pasywnym, ponieważ radiatory wymagane do pasywnego chłodzenia są większe i cięższe. W przypadku aktywnie chłodzonych urządzeń chłodzenie jest wspomagane przez wentylator. Potrzebny jest więc mniejszy i znacznie lżejszy radiator. Dzięki temu aktywnie chłodzone falowniki można transportować oraz instalować znacznie łatwiej i wygodniej.

### Dłuższa żywotność

Jak wykazały porównawcze pomiary temperatury, wysokie temperatury mają krytyczne znaczenie, szczególnie w przypadku wrażliwych elementów elektronicznych falownika. Im są cieplejsze, tym większe prawdopo-

dobieństwo awarii. Nawet wzrost temperatury o zaledwie 10 stopni Celsjusza może skrócić żywotność elektroniki mocy o połowę. Fronius wykorzystuje aktywne chłodzenie, co oznacza, że komponenty są chłodzone przez wentylatory, więc ich temperatura jest niższa niż w urządzeniach z technologią pasywnego chłodzenia. Falowniki Fronius mają zatem dłuższą żywotność.

## Większa elastyczność w projektowaniu systemu

Aktywnie chłodzone falowniki wykazują większą elastyczność w zakresie projektowania systemów. Pozwalają na implementację projektów systemów, które są znacznie bardziej „asymetryczne”, niż projekty wykorzystujące pasywnie chłodzone falowniki. Urządzenia z technologią aktywnego chłodzenia są również bardzo elastyczne, jeśli chodzi o ich instalację. Można je montować zarówno pionowo i poziomo, możliwe są również kąty montażu w przedziale od 0 ° do 90 °. Z drugiej strony urządzenia z pasywnym chłodzeniem można montować tylko pionowo na ścianie.

## Wyższa wydajność

Aby zatrzymać przegrzanie elementów elektronicznych, falownik wprowadza kontrolowane obniżenie mocy wyjściowej. Takie zachowanie falowników z aktywnym chłodzeniem ma ogromne zalety w porównaniu z urządzeniami z pasywnymi systemami chłodzenia. Ze względu na znacznie niższą temperaturę w obudowie falowniki Fronius wykazują optymalne obniżenie wartości znamionowych. Ma to bezpośredni wpływ na wydajność. Urządzenia z technologią aktywnego chłodzenia zapewniają znacznie wyższą wydajność i skracają okres zwrotu inwestycji, szczególnie w cieplejszych regionach.

## Aspekty technologii pasywnego chłodzenia

### Poziom hałasu

Falowniki z technologią pasywnego chłodzenia zwykle nie mają wentylatorów, co oznacza, że poziomy hałasu są niższe.

### Wydajność

W pasywnie chłodzonych falownikach zwykle musi być zasilanych mniej wentylatorów. Dlatego czasami mają one nieco wyższą sprawność. Jednak ten pozytywny efekt znika w wysokich temperaturach poprzez efekt obniżania mocy wyjściowej (patrz rozdział 5).

## Dalszy rozwój aktywnego chłodzenia

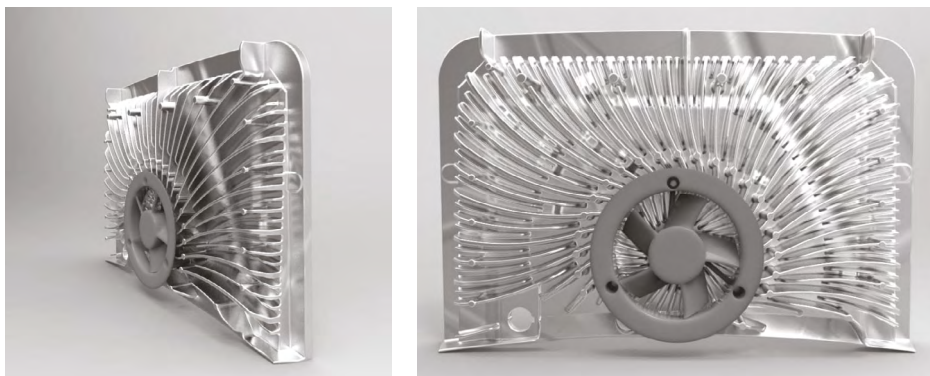
Firma Fronius jest siłą napędową innowacji w tej branży od ponad 25 lat i może polegać na własnych doświadczeniach z przeszłości oraz wynikach badań. Aktywny układ chłodzenia sprawdza się w falownikach Fronius od wielu lat.

Celem jest zagwarantowanie, że system jest zawsze tak wydajny, jak to tylko możliwe, ponieważ jego zabezpieczenie na przyszłość jest podstawową wartością firmy Fronius. Zabezpieczenie na przyszłość oznacza rozwiązania energetyczne, które są tak elastyczne i niezawodne przez cały okres ich użytkowania, że można je również dostosować do zmieniających się wymagań środowiska energetycznego.

Przez lata Fronius zawsze optymalizował aktywny system chłodzenia i dostosowywał go do nowych warunków rynkowych. Właśnie dlatego Fronius będzie nadal polegał na tej technologii i opracuje niezawodne, opłacalne i zrównoważone rozwiązania energetyczne z aktywnym chłodzeniem - na dziś, jutro i na przyszłość. Obecnie inżynierowie starają się opracowywać zaawansowane urządzenia elektroniczne, które są małe i mają niewielką objętość, ale mają również najwyższą możliwą średnią gęstość mocy, aby obniżyć koszty produkcji, koszty uzyskania energii oraz ułatwić obsługę urządzeń. Wymóg ten stanowi poważne wyzwanie dla systemów chłodzenia komponentów elektronicznych.

## Fronius GEN24 Plus oraz GEN24

Kluczowym elementem w rozwoju urządzeń Fronius GEN24 Plus oraz GEN24 była potrzeba zaprojektowania płaskiego, ale bardzo wydajnego systemu, zawierającego jeden radiator i jeden wentylator do chłodzenia elementów elektroniki mocy. Sercem tego podejścia do chłodzenia jest indywidualnie zaprojektowana obudowa wentylatora, która jest zintegrowana z wnęką w odlewanym aluminiowym radiatorze ze specjalnie rozmieszczonymi żeberkami chłodzącymi (patrz rysunek poniżej).



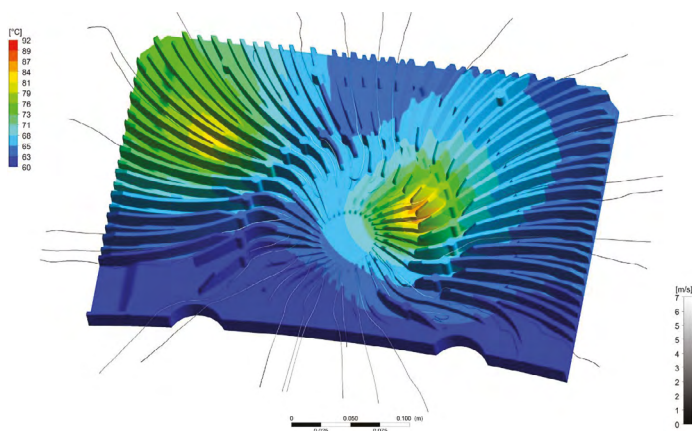
**Rysunek 16:** Innowacyjny system chłodzenia Fronius GEN24 Plus oraz GEN24  
[źródło: Fronius]

Ta obudowa jest w stanie stworzyć idealne warunki ciśnienia dla optymalizacji przepływu powietrza. Powietrze z otoczenia jest zasysane, przepływa i jest wyrzucane w najlepszy możliwy sposób, aby zapewnić skuteczne chłodzenie. Dzięki tej innowacyjnej obudowie wentylatora można wytwarzać falowniki ze znacznie mniejszą głębokością obudowy.

## Zachowanie przepływu powietrza w radiatorze Fronius GEN24 Plus oraz GEN24

Dużo pracy rozwojowej poświęcono na optymalizację aktywnego układu chłodzenia, aby chłodził jeszcze lepiej i wydajniej niż w przeszłości.

W porównaniu ze standardowym wentylatorem ( $0,6 \text{ m}^3/\text{min}$ ), teraz można przepuszczać przez system 250% ( $1,5 \text{ m}^3/\text{min}$ ) objętości powietrza więcej. Wysoki przepływ powietrza umożliwia szybkie i wydajne odprowadzanie ciepła z komponentów elektronicznych za pomocą żeber chłodzących, nawet w wysokich temperaturach otoczenia. Powoduje to niezwykle jednorodny rozkład temperatury na radiatorze (patrz rysunek 17).



**Rysunek 17:** Symulacja przepływu CFD - szybkie usuwanie ciepła za pomocą żeber chłodzących radiatora [źródło: Fronius]

Ze względu na zoptymalizowany projekt przepływu powietrza wymagana jest o 20% mniejsza moc wentylatora. Oznacza to, że mniejszy wentylator wystarcza do zapewnienia tej samej mocy chłodzenia, co w urządzeniach z tradycyjnym aktywnym chłodzeniem. Powoduje to również lepszy rozkład temperatury i niższy poziom hałasu. Korzystnym efektem jest również mniejsza masa urządzenia i mniejsza głębokość instalacji.

## Wkład w efektywną produkcję energii

Duże obudowy są kosztowne w produkcji i trudne w obsłudze dla klientów. Miejsca instalacji falowników również muszą mieć więcej miejsca. Opiszana tutaj miniaturyzacja systemu skutkuje tanimi, prostymi falownikami

fotowoltaicznymi z niewielką liczbą komponentów. Ponieważ urządzenie może być również umieszczone w bezpośrednim świetle słonecznym, nie trzeba podejmować żadnych dodatkowych środków do ochrony falownika przed ciepłem. Nie są wymagane żadne dodatkowe zacieniające dachy ani inne zacieniające rozwiązania, co z kolei oszczędza zasoby i znacznie zmniejsza koszty inwestycji klienta. Ze względu na niski pobór mocy wentylatora ten zoptymalizowany układ chłodzenia przyczynia się również do bardziej efektywnego wytwarzania energii. Dzięki ulepszonej wydajności chłodzenia temperatury występujące wewnątrz urządzenia są znacznie niższe, co wydłuża żywotność elektroniki mocy i samego urządzenia oraz przyczynia się w sposób trwały do ochrony środowiska. Ponieważ większość funkcji falownika znajduje się w aluminiowej obudowie, nie są również wymagane dodatkowe elementy z tworzywa sztucznego i metalu. Ta innowacja pomaga również oszczędzać zasoby.

## Podsumowanie

Niniejszy dokument porównuje aktywne i pasywne technologie chłodzenia falowników. Liczne testy, a także odniesienia bibliograficzne wyraźnie pokazują zalety technologii aktywnego chłodzenia. Wymuszony przepływ powietrza w aktywnie chłodzonych systemach doskonale kontroluje temperaturę w falowniku i zapewnia jego dłuższą żywotność.

Aktywnie chłodzone urządzenia są już zaletą na etapie planowania, zarówno w odniesieniu do projektu elektrycznego, jak i sposobu montażu. Ze względu na mniejszą wagę urządzenia z aktywnym systemem chłodzenia są one również łatwiejsze w transporcie i montażu, co oszczędza czas, wysiłek, a tym samym pieniądze. Ponoszone są niższe koszty obsługi, ponieważ wydatki na konserwację są niewielkie lub nie ma ich wcale. Przede wszystkim jednak to dodatkowe uzyski dzięki lepszej wydajności i dłuższej żywotności energoelektroniki uzasadniają zastosowanie aktywnego układu chłodzenia w falowniku.

## Literatura

- [1] „Calculating Useful Lifetimes of Embedded Processors”, Application Report SPRABX4A–November 2014–Revised October 2017, Texas Instruments - <http://www.ti.com/lit/an/sprabx4a/sprabx4a.pdf>
- [2] „The Effect of Temperature on The Life of Power Electronic Devices”, CTM magnetics - <http://www.ctmmagnetics.com/the-effect-of-temperature-on-the-life-of-power-electronic-devices/>
- [3] PV system Robinvale <https://www.solarweb.com/Home/GuestLogOn?pvSystemid=92147e5f-d215-4d8c-8737-a528007d3e2c>

Odwiedź strony [www.fronius.pl](http://www.fronius.pl) oraz [www.forum-ronius.pl](http://www.forum-ronius.pl), aby uzyskać dodatkowe informacje.

