

Technické specifikace

Návrh, výroba a dodávka kryogenní chladicí smyčky pro laserové hlavičky typu multislabs s optickým výkonem 100 W

Cílem projektu ELI-Beamlines je vybudování nového výzkumného pracoviště využívajícího nejmodernější laserové technologie pro základní výzkum a technologické aplikace. Jednou ze zásadních technologií pro toto pracoviště jsou nové laserové zesilovače typu multislabs, čerpané laserovými diodami, schopné poskytovat energii v jednom svazku minimálně 100 J s opakovací frekvencí nejméně 10 Hz. Tyto lasery budou využívat jako aktivního prostředí Yb:YAG s provozní teplotou typicky 150 až 160 K. Tento dokument popisuje technické specifikace týkající se návrhu, kompletace a provozní optimalizace kryogenní smyčky pro první stupeň laserových zesilovačů tohoto typu ve výzkumném centru ELI-Beamlines.

Předmětem plnění této zakázky je inženýrský a konstrukční návrh, výroba a dodávka systému kompletní kryogenní chladicí smyčky pro diodově čerpané multideskové (multislabs) laserové zesilovače poskytujících nanosekundové pulsy s nominální energií 10 J a s repeticí 10 Hz.

Předmět plnění Zakázky

D1 Koncepční, technický a konstrukční návrh, výroba a dodávka kryogenní chladicí smyčky pro 10 J 10 Hz laserovou hlavičku

V rámci tohoto dílčího plnění jsou požadovány následující aktivity:

D1a) Vypracovat koncepční technické schéma kryogenního chladicího okruhu pro multideskový laserový zesilovač s optickým výkonem 100 (± 30) W (nominálně 10 J/10 Hz), pracující při nominální teplotě 150 K.

Vypracované technické schéma musí být v souladu s podrobnými fyzikálními a technickými specifikacemi uvedenými níže, zejména údaji v Tabulce 1. Je požadováno, aby systém využíval uzavřený Braytonův cyklus, přičemž je upřednostňována varianta disipace veškerého tepla do vodního chladicího okruhu, tj. systém nevyžadující využití dusíku v systému. Jako vlastní chladicí médium multideskového zesilovače musí být použito plynné helium, z důvodu unikátně nízkého indexu lomu v dané oblasti optického spektra a vysokého koeficientu tepelné vodivosti. Technické řešení přívodního potrubí přivádějícího He chladivo do laserové hlavičky musí zahrnovat vakuovou izolaci a musí být navrženo s cílem nulového mechanického přenosu vibrací z centrální chladicí jednotky do laserové hlavičky. Koncepční schéma musí mimo jiné obsahovat řešení uspořádání centrální chladicí jednotky („cold box“) a řešení uložení rotačních částí turbocirkulátoru.

Vytvořené koncepční schéma bude předloženo zadavateli k odsouhlasení. Po zapracování jeho připomínek bude vytvořena Koncepční technická dokumentace.

Výstupem dílčího plnění D1a) bude technická zpráva.

Termín: 2 měsíce po podpisu smlouvy

D1b) Rozpracování kompletního technického (*basic engineering*) a konstrukčního návrhu (*detailed engineering*) kryogenního chladicího okruhu dle Koncepční technické dokumentace vypracované v dílčím plnění D1a), výroba a testování smyčky u dodavatele (*on-shop test*)

V rámci tohoto úkolu provést optimalizaci termodynamických parametrů soustavy proudícího helia, provést návrh, výpočet a detailní konstrukci chladicí jednotky uzavřeného okruhu výměníku tepla (He při nominální teplotě 150 K jako aktivní chladivo laserové hlavice), navrhnutí dmychadlo uzavřeného chladicího heliového okruhu, navrhnutí vakuové systémy a vypracovat návrh autonomního elektronického řídicího a diagnostického systému (*DACS - Data Acquisition and Control System*), který musí poskytovat rozhraní (sběrnici) pro ovládání řídicím systémem využívajícím architekturu EPICS. Dmychadlo (turbocirkulátor) a jeho ložiska musí být navrženy tak, aby do systému nevnášely mechanické nečistoty nebo stopy maziva.

V návaznosti na vypracovaný kompletní technický a konstrukční návrh (výrobní dokumentaci) chladicí smyčky vyrobit její komponenty, následně chladicí smyčku sestavit a provést sérii testů za účelem ověření dosažení bezporuchového chodu s nominálními parametry uvedenými v Tabulce 1 níže. Výroba, proces sestavení smyčky a plnění aktivního He okruhu musí garantovat absenci mechanických nečistot v He chladivu větších než 5 μm . Testy musí prokázat bezporuchový nepřetržitý provoz po dobu nejméně 4 hodin. Pro realizaci testů dodavatel zhotoví jednoduchý rozměrově ekvivalentní (proudově odporový) simulátor laserové hlavice, dle specifikací dodaných zadavatelem. Tento simulátor bude vybaven topným odporem simulujícím ztrátové teplo v nominální hodnotě 300 W, vznikajícího následkem laserové akce.

Výstupem dílčího plnění D1b) bude technická zpráva obsahující podrobnou technickou dokumentaci a protokol o průběhu zkoušek (*on-shop test*) s popisem dosažených parametrů

Termín: 8 měsíců po podpisu smlouvy

D1c) Dodání zhotovené a otestované smyčky na pracoviště zadavatele, instalace a napojení na laserovou hlavici 10 J/10 Hz zesilovače

V rámci tohoto úkolu dodavatel odzkoušenou chladicí smyčku z dílčího plnění D1b demontuje, hermeticky uzavře pro zamezení kontaminace nečistotami a převeze na pracoviště zadavatele (Fyzikální ústav AVČR, v.v.i., Praha 8), kde smyčku instaluje, napojí na laserovou hlavici a naplní He chladivem. Laserová hlavice a chladicí smyčka budou instalovány v prostorech čistoty třídy ISO 7 (10,000). Veškerá rezidentní čidla parametrů chladicího média (teplota, rychlost proudění, tlak, ev. další) musí být dodány spolu se systémem smyčky. Součástí dodávky musí být dále systém plnění chladicího okruhu plynným heliem a lokální (autonomní) řídicí systém. Systém primárního vakuového čerpání (*roughing vacuum*) do úrovně tlaku 10^{-2} mbar bude poskytnut zadavatelem.

Výstupem dílčího plnění D1c) bude instalovaná kryogenní chladicí smyčka napojená na laserovou hlavici 10 J 10 Hz na pracovišti zadavatele

Termín: 8 měsíců a 2 týdny po podpisu smlouvy

D1d) Realizace série testů na pracovišti zadavatele při provozu laserové hlavice 10 J/10 Hz zesilovače (*on-site test*)

V rámci tohoto úkolu dodavatel instalovanou a napojenou chladicí smyčku z dílčího plnění D1c uvede do provozu, přičemž prokáže splnění nominálních parametrů uvedených v Tabulce 1 níže, při současném fungování laserové hlavice na nominálním optickém výkonu 100 W. Smyčka musí prokázat bezporuchový chod se současně fungující laserovou hlavici po dobu nejméně 1 hodiny.

Výstupem dílčího plnění D1d) bude kryogenní chladicí smyčka zprovozněná v režimu aktivního chodu laserové hlavice s výkonem 100 W na pracovišti zadavatele

Termín dodání: 11 měsíců po podpisu smlouvy

D2 Konzultační činnost

Předmětem dílčího plnění D2 je poskytování služeb konzultačního servisu za účelem optimalizace provozních parametrů chladicí smyčky integrované do laserového řetězce 10 J 10 Hz.

Rozsah požadovaných služeb činí až 500 hodin, přičemž se jedná o rámcové množství, které bude zadavatel čerpat dle svých skutečných budoucích potřeb.

Služby mohou být objednávány až do konce roku 2017.

D3 Pozáruční a mimozáruční servis

Předmětem dílčího plnění D3 je odstraňování defektů na chladicí smyčce, které nespádají do záručního servisu nebo které se vyskytly v době po uplynutí záruky. Dále jde o servisní zásahy a činnosti, které nemají povahu odstraňování vad a slouží k udržení či prodloužení funkčnosti dodaných zařízení.

Rozsah požadovaných služeb činí 500 hodin, přičemž se jedná o rámcové množství, které bude zadavatel čerpat dle svých skutečných budoucích potřeb.

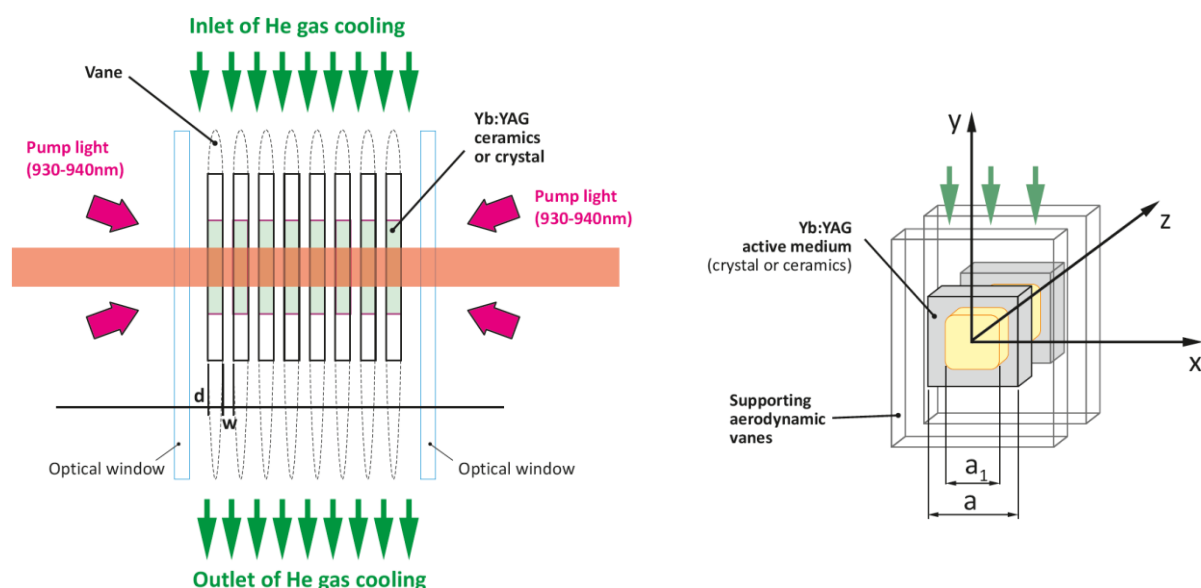
V případě poruchy je vyžadován nástup do 48 hodin po oznámení poruchy, identifikace, návrh opatření k odstranění poruchy a následné odstranění, případné odstranění poruchy dálkově.

Služby mohou být objednávány až do konce roku 2017.

Podrobné fyzikální a technické specifikace

1. Základní principy

Požadovaná kryogenní smyčka je určena k chlazení aktivního prostředí multideskového (multislab) diodově čerpaného laserového zesilovače, který bude zesilovat laserové pulsy o délce cca 10 ns z počáteční úrovně cca 100 mJ na výstupní úroveň 10 J, při opakovací frekvenci 10 Hz. Uspořádání multideskového laserového zesilovače je schematicky znázorněno na obr. 1. Aktivní médium se v konkrétním případě skládá ze čtyř desek materiálu Yb:YAG o tloušťce 5 mm, oddělených kanálky o šířce 1.5 mm pro nucené proudění plynného He chladiva. Helium je zvoleno pro svůj jedinečně nízký index lomu a vysokou tepelnou vodivost. Čerpaná část každé desky (osvětlená čerpacími laserovými diodami) je obklopena pláštěm a mechanickým rámem.



Obrázek 1. Geometrie kryogenní hlavice Yb:YAG zesilovače znázorňující bokorys (vlevo) a izometrický pohled na desky (vpravo). Pro konkrétní laserovou hlavici 10 J 10 Hz je počet desek = 4, tloušťka $d = 5$ mm, šířka kanálů $w = 1.5$ mm.

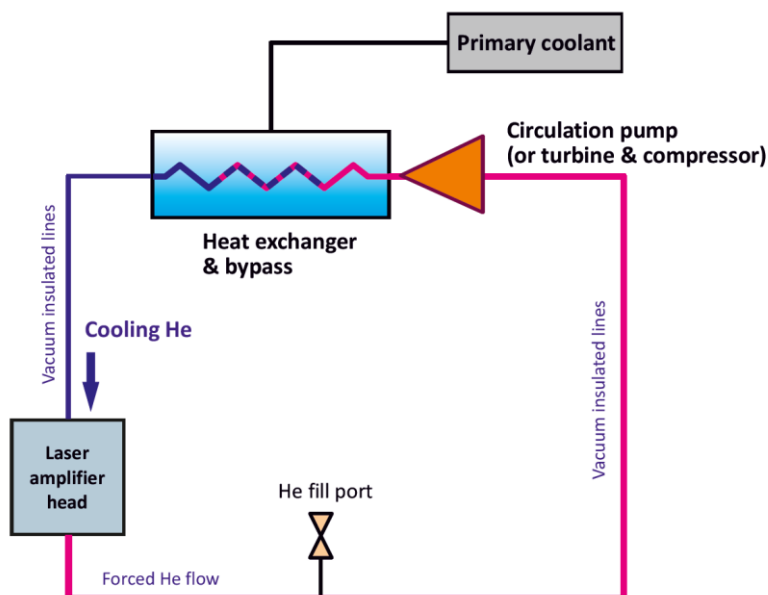
Obecné schéma požadované kryogenní chladicí smyčky pro evakuaci tepla z multideskového laserového zesilovače je zobrazeno na obrázku 2. Smyčka zajišťuje **nucené proudění plynného hélia** přes hlavici zesilovače. Hlavní komponenty kryogenní smyčky zahrnují mimo jiné:

- oběhové turbočerpadlo (turbocirkulátor) a kompresor;
- výměník tepla napojený na zdroj primárního chladu;
- systém jemné regulace teploty He (na obrázku není znázorněn);
- teplotní, tlaková a průtoková čidla (na obrázku nejsou znázorněna);
- systém pro vakuové čerpání a plnění heliové smyčky;
- pojistný přetlakový ventil;
- izolované přívodní potrubí (kryogenní a "teplé") propojující hlavici zesilovače s chladicím systémem;
- lokální elektronický řídicí a diagnostický systém (DACS - *Data Acquisition and Control System*).

Chladicí smyčka musí umožňovat evakuaci ztrátového tepla ve výši nejméně 300 W z vlastní laserové hlavice a musí být schopna s rezervou pokrýt tepelné ztráty vznikající v přívodním potrubí

(odhadováno na minimálně 300 W). Smyčka by tak měla být dimenzována na celkový výkon alespoň 800 W.

Smyčka musí být vybavena ventily umožňujícími vakuové odčerpání chladicího potrubí před jeho plněním tlakovým He. Systém vakuového odčerpání musí využívat suché vývěvy (TMP) pro zabránění kontaminace okruhu mazivem ložisek nebo jinými nečistotami.



Obrázek 2. Generické schéma kryogenní chladicí smyčky a jejích hlavních součástí (konkrétní schéma smyčky závisí na konkrétní implementaci termodynamického cyklu typu Brayton s disipací tepla do vody nebo do jiného zdroje primárního chladu). Chladicí smyčka musí umožnit evakuaci ztrátového tepla nejméně 300 W z laserové hlavičky a musí obsahovat teplotní čidla na vstupu a výstupu laserové hlavičky, na výstupu centrální chladicí jednotky ("cold box") a na všech kritických subsystémech centrální jednotky, na nichž dochází ke změně teploty nebo tlaku.

Požadovaná chladicí smyčka pro laserovou hlavici třídy 10 J / 10 Hz musí být optimalizována na nominální parametry (nominální provozní podmínky), uvedené v následující Tabulce 1.

Tabulka 1: Základní specifikace parametrů chladicí smyčky pro laserovou hlavici třídy 10 J / 10 Hz

Průtok hélia (nominální)	30 g/s
Provozní tlak He na vstupu do laserové hlavičky	10 bar
Teplota He na vstupu do laserové hlavičky	150 K, nastavitelná po krocích 5 K
Stabilita teploty	+/-1 K nebo lepší
Tlakový spád na laserové hlavici	0.03 bar
Dosažení provozních podmínek	<30 min (po zapnutí smyčky)
Tepelný výkon odváděný z laserové hlavičky proudícím He (ztrátový výkon deponovaný laserovým procesem)	min. 300 W
Požadovaná úroveň izolačního vakua (izolační vakuum v laserové hlavici a přívodním vedení)	10 ⁻⁵ mbar nebo lepší
Povinné umístění teplotních čidel (další teplotní čidla musí být umístěna v centrální jednotce)	na vstupu a na výstupu las. hlavičky
Systém rozhraní izolačního vakuového vedení	DN100 ISO-K
Vnitřní průměr He vedení na vstupu do laserové hlavičky	40 mm

Tlaková bezpečnost

Systém chladicí smyčky musí být tlakově odzkoušen na hodnotu vyšší než provozní tlak, ve smyslu ČSN EN 13480.

Vlastní hlavice Yb:YAG multideskového zesilovače je tlakově pevnostně dimenzovaná dle výrobce.

Plnění smyčky chladivem

Možná procedura plnění chladicí smyčky heliem spočívá v napuštění okruhu z tlakové lahve při pokojové teplotě a při tlaku cca 20 bar (nutno dodržet podmínku neznečištění výpary uhlovodíků a jiných plynů, ani prachovými částicemi většími než 2 µm). Smyčka je poté hermeticky uzavřena. Pracovní tlak cca 10 bar je v systému vytvořen ochlazením He na cca 150 K.

Dílčí plnění D1 může předložit i jiný návrh postupu plnění chladicí smyčky, tento však musí být před zapracováním do Koncepční technické dokumentace (viz Dílčí plnění D1) schválen zadavatelem.

Rozsah provozních parametrů

Chladicí smyčka musí být v principu schopná funkce v rozsahu tlaků 0 až 12 bar a rozsahu teplot 100 až 300 K, není však nutné, aby provozní parametry (např. stabilita teploty) byly optimalizovány v celém tomto rozsahu.

Operační režim

Chladicí smyčka musí být schopná nepřetržitého provozu. V nominálním operačním režimu je předpokládán běh smyčky v pracovní dny po dobu 8 hodin.

Uspořádání smyčky a laserové hlavy pro realizaci série testů (dílčí plnění D1d)

Pro realizaci série testů, které jsou předmětem dílčího plnění D1d, bude chladicí smyčka umístěna na stejném podlaží jako laserová hlavice. Konkrétní konfiguraci určí zadavatel, přičemž vzdálenost centrální jednotky (*cold box*) od laserové hlavy přitom nepřesáhne 10 m. Konfigurace uspořádání smyčky ve výzkumném centru ELI-Beamlines je popsána níže v Kap. 3.

2. Provedení hlavy a rozhraní

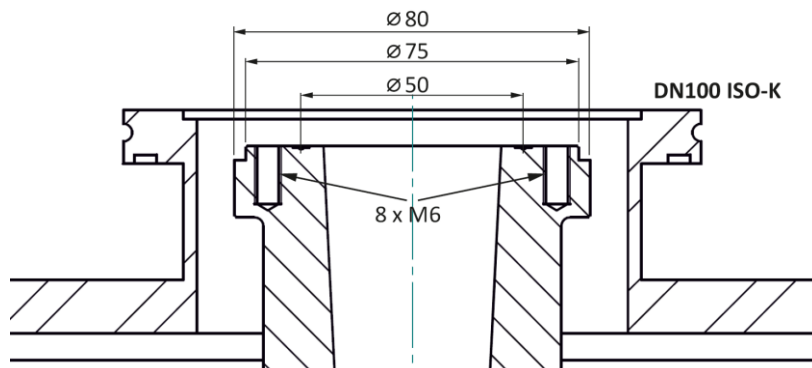
Laserová hlavice a nominální schéma její montáže (konstrukce podpůrného rámu je pouze indikativní) jsou znázorněny na obr. 3. Optická osa systému je ve výšce cca 1.1 m. Laserová hlavice je připojena na chladicí smyčku na horní a dolní stěně hlavy izolovaným potrubím s vnitřním průměrem tlakového He vedení 40 mm a s izolačním vakuovým pláštěm typu DN100 ISO-K. Horní (přívodní) a dolní (výstupní) rozhraní jsou konstrukčně identické.

¹ Požadovaným řešením zadavatel stanovuje minimální standard. Je možné použití i jiných kvalitativně a technicky obdobných řešení.



Obrázek 3. Laserová hlavice 10 J 10 Hz na podpůrném stojanu. Optická (laserová) osa systému je ve výšce cca 1.1 m.

Podrobné schéma rozhraní laserové hlavice pro napojení chladicího vedení je znázorněno na obr. 4. Tlakový heliový okruh je připojen specifickým rozhraním využívajícím těsnění typu EVAC ISO CeFiX® (technický popis tohoto systému těsnění viz www.evacvacuum.com) o průměru 50 mm. Detailní technický výkres rozhraní (upřesnění obr. 4) s vyznačením tolerancí bude dodavateli předán po podpisu smlouvy.



Obrázek 4. Rozhraní laserové hlavice 10 J 10 Hz pro napojení na přívodní chladicí a izolační vedení. Tlakový heliový okruh je připojen specifickým rozhraním využívajícím těsnění typu EVAC ISO CeFiX®.

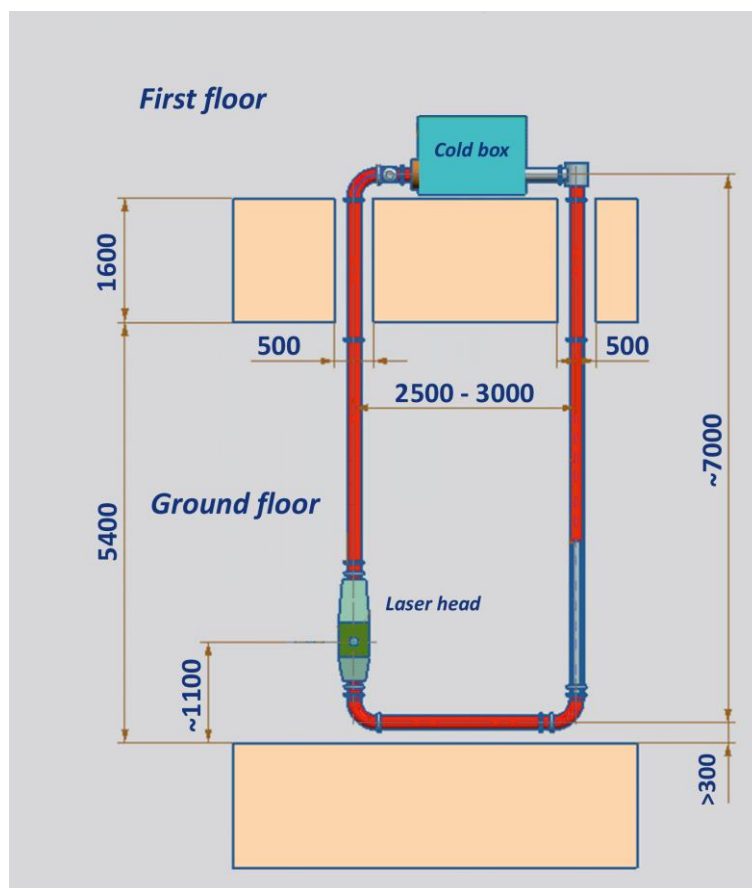
Geometrie chladicího vedení

Výstupní vedení a zpětný přívod He chladiva mohou být napojeny na centrální jednotku (*cold box*) z boku, dodavatel však může zvolit i jinou geometrii. Zvolené uspořádání musí umožňovat jednak instalaci chladicí jednotky a přívodního He/vakuového vedení ve stejném podlaží jako laserová hlavice (pro účely zkoušek bezprostředně po dodání chladicí smyčky), jednak instalaci chladicí jednotky v technologickém podlaží budovy ELI-Beamlines, ležícím nad podlažím, v němž bude umístěn laserový systém.

3. Integrace chladicí smyčky do budovy ELI-Beamlines (finální instalace systému)

Centrální jednotka kryogenního chlazení (*cold box*) v budově ELI-Beamlines bude umístěna v prvním (technologickém) patře budovy, zatímco laserová hlavice / laserový systém budou umístěny v přízemí. Kryogenní potrubí bude vedeno do přízemí stropními prostupy o velikosti 500x500 mm. Požadované schéma vertikálního upořádání instalované smyčky je znázorněno na obr. 5.

Před instalací do budovy ELI-Beamlines bude chladicí smyčka spolu s laserovým multideskovým zesilovačem testována v jednopodlažních prostorách Fyzikálního ústavu AV ČR, v.v.i. Vzdálenost mezi centrální jednotkou kryogenního chlazení a laserovou hlavicí bude v tomto uspořádání max. 10 m.



Obrázek 5. Vertikální uspořádání kryogenní chladicí smyčky a hlavice laserového zesilovače v budově ELI-Beamlines. Laserová hlavice je umístěna v přízemní části budovy, centrální kryogenní jednotka v prvním (technologickém) patře. Výškový rozdíl mezi oběma podlažími je 7 m.

Montáž kryogenní smyčky v budově ELI-Beamlines musí využít hlavní zátěžový výtah a servisní dveře, které umožní přepravu zařízení o celkových maximálních rozměrech 4 x 5 m, maximální výšce 2,5 m a maximální hmotnosti 10 tun. V prvním patře budovy ELI-Beamlines (tj. v místě, kde budou umístěny chladicí smyčky) nebudou k dispozici žádné stropní jeřáby, proto instalace a údržba smyček bude muset být realizovatelná pomocí lokálních manipulačních (zdvihacích) systémů a zařízení.

Napájecí zdroje a podpůrné rozvody

Tato kapitola obsahuje předběžný popis nástrojů, které budou k dispozici v zařízení ELI-Beamlines a které mohou obsluhovat kryogenní smyčky.

a) Elektrické napájení

Všechny subsystémy elektrického napájení musí užívat standardní 230 V / 50 Hz jednofázové a/nebo 400 V / 50 Hz, třífázové napájení 400 V (3P + N) dle příslušných norem platných v ČR a EU. Všechny elektrické součástky musí vyhovovat mezinárodním standardům IEC.

b) Stlačený vzduch

Pro pneumatické aktuátory a ventily bude v prostorách ELI-Beamlines k dispozici čistý a suchý stlačený vzduch (tlak 10 bar, olejové nečistoty $<0,01 \text{ mg/m}^3$, rosný bod -40° C , dle normy ISO 8573-1).

c) Chladicí voda

V ELI-Beamlines bude k dispozici uzavřený chladicí okruh, zajišťující 19° C demineralizovanou a deionizovanou vodu. Smyčka může též využívat standardní užitkovou vodu (tlak cca 0,5 MPa, max. pokles tlaku 0,25 MPa, teplota 20 až 25° C).

d) Ventilace / klimatizace

V prvním technologickém patře laserové budovy ELI-Beamlines bude klimatizované prostředí zajišťující stabilitu teploty a čistotu prostředí třídy 100000 (ISO 8). Laserové haly v přízemí budou vykazovat čistotu prostředí třídy 10000 (ISO 7), při teplotě 21° C s dlouhodobou stabilitou $\pm 0,5^\circ \text{ C}$ při relativní vlhkosti 40 až 60%.

e) Vakuový systém

V objektu ELI-Beamlines bude k dispozici primární vakuum (cca 10^{-2} mbar) z centrální distribuce (DN250 a DN100 ISO-K) pro účely primárního čerpání (*roughing pumping*) i předčerpávání vývěv (např. TMP) pro sekundární vakuum (*backing pumping*). Dodávka primárního vakuového čerpacího systému není proto součástí požadovaného plnění.

f) Lokální kontrolní systém

Lokální kontrolní systém chladicí smyčky musí být schopen zajistit automatické ovládání a bezpečný provoz i vypnutí v případě poruchy. Kryogenní smyčka musí zahrnovat místní systém na bázi programovatelné logiky (*Programmable Logic Controller, PLC*), poskytující vhodné rozhraní (např. IP) pro napojení tohoto kontroléru na ovládací PC laserové hlavice 10 J 10 Hz.

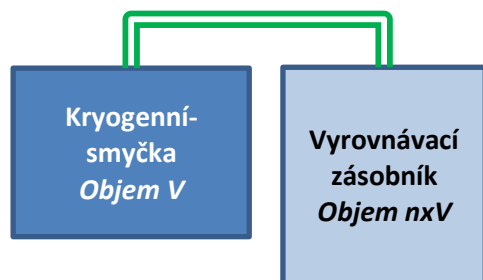
Níže uvedené informace slouží k upřesnění technických detailů spojených se vznesenými otázkami.

Doplnění fyzikálních a technických specifikací

1. Vyrovnávací zásobník (buffer) He chladiva

Zadavatel připouští řešení využívající vyrovnávacího zásobníku pro snížení počátečního (plnicího) tlaku v systému smyčky (viz. shora, když se uvádí, že dodavatel může v rámci dílčího plnění D1 předložit vlastní návrh postupu plnění chladicí smyčky).

Dodavatel by měl zvážit výhodnost využití vyrovnávacího zásobníku – jde o subsystém navíc, který však snižuje tlakové nároky okruhu při plnicí proceduře a rovněž při vypnutém stavu smyčky.



Obr. 1: Zjednodušené blokové schéma kryogenní smyčky a vyrovnávacího zásobníku.

Pro tlak v systému lze odvodit jednoduchý vztah. Za předpokladu, že

- Množství He v systému je konstantní (uzavřený okruh)
- He ve vyrovnávacím zásobníku je vždy na pokojové teplotě T_R
- Tlak v kryogenní chladicí smyčce a ve vyrovnávacím zásobníku je stejný

platí pro tlak p :

$$p = p_o \frac{n + \frac{T_R}{T_o}}{n + \frac{T_R}{T}}$$

kde

T	Teplota chladicí smyčky při tlaku p
T_o	Provozní teplota chladicí smyčky (aktivní režim kryogenního chlazení)
p_o	Tlak v systému při provozní teplotě T_o
n	Poměr objemu vyrovnávacího zásobníku a objemu chladicí smyčky
T_R	Pokojeová teplota

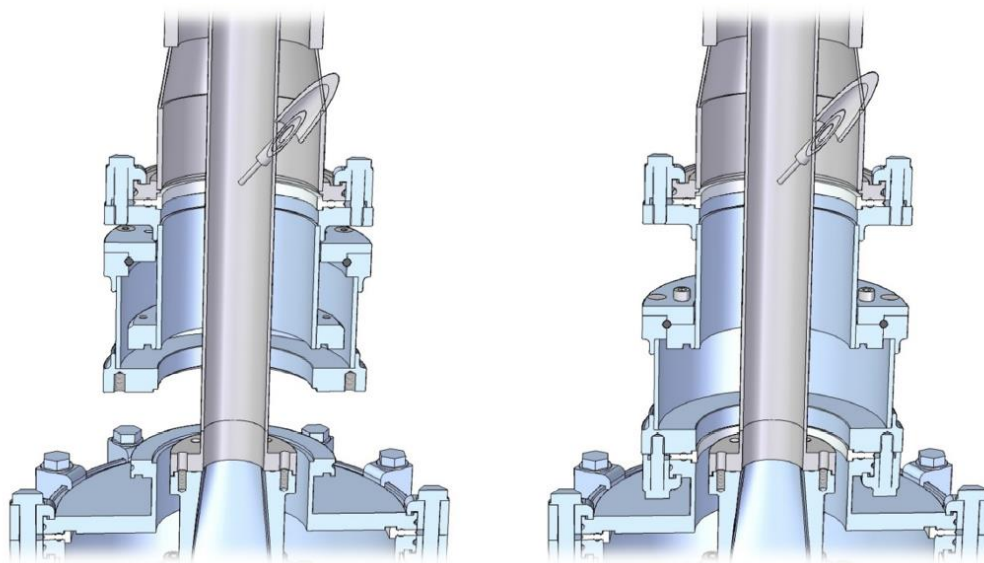
Dle výše uvedeného vzorce lze stanovit rozdíl tlaku ve smyčce mezi hodnotami teplot $T_o=150$ K (nominální režim chlazení laserové hlavičky, viz Příloha 3 Zadávací dokumentace) a $T=300$ K (klidový stav systému a rovněž teplota plnění smyčky):

- | | |
|---|-----------------------|
| 1. $n=0$ (bez vyrovnávacího zásobníku) | $p = 2 \times p_o$ |
| 2. $n=1$ (vyrovnávací zásobník o objemu kryogenní smyčky) | $p = 1.5 \times p_o$ |
| 3. $n=2$ (vyrovnávací zásobník s 2x objemem kryogenní smyčky) | $p = 1.33 \times p_o$ |
| 4. $n=5$ (vyrovnávací zásobník s 5x objemem kryogenní smyčky) | $p = 1.17 \times p_o$ |

Je zřejmé, že vyrovnávací zásobník umožňuje zásadním způsobem snížit plnicí tlak He oproti řešení bez zásobníku: při provozním tlaku v režimu chlazení 10 bar (viz Tabulka 1 na str. 5 tohoto dokumentu) musí být plnicí tlak systému bez zásobníku 20 bar, zatímco např. u zásobníku s dvojnásobným objemem kryogenní smyčky se plnicí tlak snižuje na 13.3 bar. Je na dodavateli, aby navrhl optimální řešení vzhledem k ceně a technické kvalitě nabídky.

2. Přípojné rozhraní

Přípojné rozhraní (*sliding joint*) mezi kryogenním potrubím a laserovou hlavicí zajišťuje zadavatel. Technické provedení přípojného rozhraní a způsob montáže jsou znázorněny níže na obrázku 2. Dodavatel musí zajistit, aby kryogenní vedení a izolační vakuové potrubí rozměrově odpovídalo údajům uvedeným na obr. 4 (str. 7 výše).



Obr. 2: Schéma konstrukce přípojného rozhraní (*sliding joint*) a postup montáže kryogenního potrubí a izolačního vakuového potrubí.