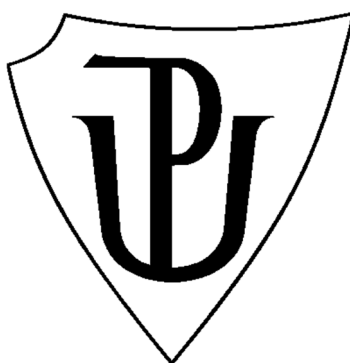


Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky



DISERTAČNÍ PRÁCE

Systemy pro řízení a sběr dat při syntéze supertěžkých prvků na stanovištích plynových separátorů DGFRS-I a DGFRS-II v SÚJV Dubna.

Autor:	Mgr. Leo Schlattauer
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok:	2020

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Mgr. Leo Schlattauer
Název práce	Systémy pro řízení a sběr dat při syntéze supertěžkých prvků na stanovištích plynových separátorů DGFRS-I a DGFRS-II v SÚJV Dubna
Typ práce	Disertační
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2020
Klíčová slova	Factory of superheavy elements, DGFRS-I, DGFRS-II, vzdálené řízení, digitální osciloskop, ostrov stability, oboustranný páskový křemíkový detektor, LabVIEW, Datalogging and Supervisory Control Module, INTEL CPLD
Počet stran	136
Počet příloh	21
Jazyk	Český

Abstrakt

Disertační práce mapuje vývoj a nasazení nového, plynem naplněného separátoru Dubna Gas-Filled Recoil Separator II (DGFRS-II) do provozu v Laboratoři jaderných reakcí Spojeného ústavu jaderných výzkumů (SÚJV) v Dubně, Ruská federace. Jedná se o experimenty, kde pomocí jaderné fúzní reakce dochází k syntéze nových nepoznaných izotopů. Autor práce předkládá několik podsystémů vytvořených na míru pro nové experimentální pracoviště. Součástí práce je i zhodnocení výsledků naměřených parametrů separátoru na základě testových reakcí s různými druhy ionů (Ca, Ar) a různými druhy terčů (Yb, Pb, Er) v závislosti na podmínkách v separátoru. V době tisku této práce představují tyto výsledky dosud nepublikovaná experimentální data.

Bibliographical identification

Author's first name and surname	Mgr. Leo Schlattauer
Title	Data acquisition and control systems used for synthesis of superheavy elements at experiments DGFRS-I, DGFRS-II, JINR Dubna
Type of thesis	Dissertation
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	Assoc. Prof. Dr. Jiří Pechoušek
The year of presentation	2020
Keywords	Factory of superheavy elements, DGFRS-I, DGFRS-II, Island of stability, Double-Sided Silicon Strip Detectors, LabVIEW, Datalogging and Supervisory Control Module, INTEL CPLD
Number of pages	136
Number of appendices	21
Language	Czech (English)

Abstract

This dissertation thesis is following commissioning of the new Dubna Gas-filled Recoil Separator II (DGFRS-II) in Flerov Laboratory of Nuclear Reactions Joint Institute for Nuclear Research Dubna Russian federation. Main principle is based on using cold fusion reactions for producing new isotopes of unknown elements. This work will provide detailed description of new on site developed subsystems for this experimental facility. Overall DGFRS-II performance and test reactions will be also mentioned for different ions (Ca, Ar) and different target materials (Yb, Pb, Er). This is also dependent on separator settings as well. Results and discussion are fresh in some cases unpublished experimental data actual to the date of this work.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D. a pod odborným dohledem přímo na pracovišti A.A. Voinova a Dr. V.K. Utyonkova z SÚJV Dubna. Prohlašuji, že jsem uvedl všechny odborné a literární zdroje a dodržoval zásady vědecké etiky.

V Olomouci dne

.....

Mgr. Leo Schlattauer

Poděkování

Děkuji školiteli doc. RNDr. Jiřímu Pechouškovi, Ph.D. KEF PŘF UP v Olomouci za dlouholeté vedení, spolupráci a odbornou pomoc při zpracování této disertační práce.

Dále,

Dr. Alojzi Kovalíkovi UJF AV ČR, SÚJV,

Dr. Vratislavu Chudobovi SÚJV za vedení českých pracovníků v SÚJV.

Konzultantům,

Prof. Miroslavu Mašláňovi KEF PŘF UP v Olomouci,

Mgr. Alexeji Voinovovi SÚJV,

Dr. Vladimíru Utyonkovi SÚJV, za jejich trpělivost a obětavost, bez kterých by moje spolupráce s SÚJV, a tudíž i tato práce nemohla vzniknout.

Dále,

lidem z prvního oddělení Laboratoře Jaderných reakcí v SÚJV, se kterými jsem úzce spolupracoval během mé stáže:

Mgr. Alexandru Polyakovovi, Mgr. Jurijovi Tsyganovovi, Dr. Vladimíru Subbotinovi, Mgr. Alexandrovi Podshibjakinovi, Mgr. Dmitriji Kuznetsovovi, Alexandru Sukhovovi in memoriam.

Děkuji IGA projektu vedeném na Univerzitě Palackého v Olomouci (IGA_PrF_2020_011) za finanční podporu mé práce.

Obsah

Výpis publikací autora	8
Seznam zkratk a symbolů	9
1. Úvod	11
1.1) Výsledky z provedeného experimentu $^{48}\text{Ca}+^{240}\text{Pu}$ v letech 2016-2017	16
2. Monitorovací a řídicí systém DGFRS-I	27
3. Systém měření energie svazku z urychlovače	31
3.1) Nová technická realizace TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II.....	34
3.2) Výměna dat a reálná data	35
3.3) Vyvinutý SW + NI webserver + LV DSC + integrace do celku	36
4. Spektrometrie na DGFRS-II.....	40
4.1) Obrázek 13.1 Detekční komora DGFRS-II včetně předzesilovačů, PID regulace plynu i proporcionální drátkové komory.....	41
5. Monitorovací a řídicí systém DGFRS-II	45
6. Systém havarijního vypnutí DGFRS-II	50
7. DGFRS-II první testy, výsledky srovnání charakteristiky	57
Závěr.....	59
Diskuze	61
Použité zdroje.....	62
Seznam příloh.....	64
Příloha A Spoluautorská publikace Development of the Active Correlation Method: Theoretical- Methodological Aspect.....	65
Příloha B Spoluautorská publikace New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements	75
Příloha C Spoluautorská publikace NEW PARTICLE POSITION DETERMINATION MODULES FOR DOUBLE SIDED SILICON STRIP DETECTOR AT DGFRS.....	79
Příloha D Spoluautorská publikace AN UPGRADED E-TOF- $\Delta E1$ - $\Delta E2$ BASED SPECTROMETER OF THE DUBNA GAS-FILLED RECOIL SEPARATOR	85
Příloha E Spoluautorská publikace: DEVELOPMENT OF THE AUTOCALIBRATION SYSTÉM FOR THE DGFRS SPECTROMETER BASED ON THE DOUBLE-SIDED SILICON STRIP DETECTORS.....	94
Příloha F Autorská publikace: Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW based digital systém	99
Příloha 1 Navržený modul pro spektrometr 6-ИЛИ	111
Příloha 2 Aplikace pro vzdálené řízení PID regulátoru průtoku pentanem v detektoru.....	115

Příloha 3 realizace osmi čítačů / intenzimetrů a 8bitového výstupního registru za pomoci NI LabVIEW, kontroléru Wiener CC USB a univerzální karty CMDGG-8.....	116
Příloha 4 Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer CenterThree a jeho vzdálenou konfiguraci.....	120
Příloha 5 Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer TPG362 a jeho vzdálenou konfiguraci.....	121
Příloha 6 Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer TPG366 a jeho vzdálenou konfiguraci.....	123
Příloha 7 Realizace přípravku pro nastavení modulu komparátorů technologických parametrů DGFRS-II na úrovni HW.....	125
Příloha 8 Automatický test starých vstupních registrů sběrnice CAMAC.	126
Příloha 9 Spektrometr CAMAC na bázi NI LabVIEW a kontroleru Wiener XX USB.....	127
Příloha 10 Program pro vizualizaci 16 kanálových spekter s možností otevřít 16 spekter v novém okně jako paralelní procesy.....	128
Příloha 11 Program pro testování modulu poruch vyvíjené A.M. Sukhovem pro DGFRS-II.....	130
Příloha 12 Funkce zápisu denníku měření energie svazku z TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II.....	131
Příloha 13 Funkce pro volání Windows API pro čtení hlasem poruch separátoru DGFRS-II.....	132
Příloha 14 Prototyp nového vstupního registru sběrnice CAMAC KR-005M ve vývoji	133
Příloha 15 Diagnostická aplikace pro test pozičního detekčního systému příletu částice do DSSD ..	135

Výpis publikací autora

Publikace s IF:

Schlattauer, L., Parali, L., Pechousek, J., Sabikoglu, I., Celiktas, C., Tektas, G., ... Prochazka, V. (2017). Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW-based digital system. *European Journal of Physics*, 38(5). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa7a7a>

IF: 0,861 (2019) citace: 1

Utyonkov, V. K. and Brewer, N. T. and Oganessian, Yu. Ts. and Rykaczewski, K. P. and Abdullin, F. Sh. and Dmitriev, S. N. and Grzywacz, R. K. and Itkis, M. G. and Miernik, K. and Polyakov, A. N. and Roberto, J. B. and Sagaidak, R. N. and Shirokovsky, I. V. and Shumeiko, M. V. and Tsyganov, Yu. S. and Voinov, A. A. and Subbotin, V. G. and Sukhov, A. M. and Karpov, A. V. and Popeko, A. G. and Sabel'nikov, A. V. and Svirikhin, A. I. and Vostokin, G. K. and Hamilton, J. H. and Kovrizhnykh, N. D. and **Schlattauer, L.** and Stoyer, M. A. and Gan, Z. and Huang, W. X. and Ma, L. (2018). Neutron-deficient superheavy nuclei obtained in the Pu 240 + Ca 48 reaction. *Physical Review C*, 97(1) <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.014320>

IF: 3,240 (2019) citace: 15

Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., **Schlattauer, L.**, & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045. <https://doi.org/10.1134/S1063779618060035>

IF: 0,580 (2019) citace: 3

Další výstupy:

Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Voinov, A. A., Zubarev, A. N., & **Schlattauer, L.** (2016). New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1134/S1547477116050435>

Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., **Schlattauer, L.**, & Voinov, A. A. (2017). Development of the autocalibration system for the DGFRS spectrometer based on the double-sided silicon strip detectors. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/335-339-paper-54.pdf>

Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Voinov, A. A., **Schlattauer, L.**, Shumeiko, M. V., & Barinova, S. V. (2017). An upgraded e-tof- ΔE based spectrometer of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/309-317-paper-50.pdf>

Schlattauer, L., Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Tsyganov, Y. S., & Voinov, A. A. (2017). New particle position determination modules for double sided silicon strip detector at DGFRS. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/265-270-paper-42.pdf>

Seznam zkratk a symbolů

SÚJV	Spojený ústav jaderných výzkumů v Dubně Ruská federace.
DGFRS-I	Dubna Gas-Filled Recoil Separator. Dubněnský plynem naplněný separátor I.
DGFRS-II	Dubna Gas-Filled Recoil Separator. Dubněnský plynem naplněný separátor II.
U-400 cyklotron	Urychlovač částic nacházející se ve Flerovově laboratoři jaderných reakcí v SÚJV.
DC-280 cyklotron	Urychlovač částic nacházející se ve Flerovově laboratoři jaderných reakcí v SÚJV.
DSSSD	Oboustranný křemíkový proužkový detektor z anglického DSSSD (Double sided silicon strip detector).
Z	Protonové číslo.
Barn	Jedná se o jednotku účinného průřezu, která vyjadřuje pravděpodobnost jaderné reakce. Značí se písmenem b. Běžně se uvádí s předponami pro tvorbu násobků a dílů.
pps	Particles per second. Počet částic za sekundu.
HPGe	High purity germanium detector. Polovodičový detektor ionizujícího záření na bázi vysoce čistého krystalu germania.
FWHM	Full Width at Half Maximum. Značí běžně využívanou charakteristiku rozlišení spektrometrického řetězce nebo detektoru záření. Definována je jako pološířka spektrálního fotopíku v polovině jeho maxima vyjádřená v intervalu energie.

NI LabVIEW	Vývojové prostředí. Jedná se o grafický software pro návrh aplikací vyžadující testování, měření a řízení. Jedná se o otevřenou SW platformu umožňující jednoduchou integraci systémů třetích stran (zdroje, multimetry, převodníky, atd.). LabVIEW je celosvětovým standardem pro měřicí systémy.
NI DSC	Komerční balík Datalogging and Supervisory Control Module pro distribuované systémy. Umožňuje distribuci dat mezi různými počítači, servery, klienty a programovatelnými logickými automaty a technologiemi.
IVI	Interchangeable Virtual Instrument. Lze přeložit jako záměnný virtuální přístroj. Nadace na sjednocení příkazové sady na řízení přístrojů.
PID	PID regulátor patří mezi spojité regulátory, složený z proporcionální, integrační a derivační části.
Torr	Dříve používaná jednotka tlaku. Přesný převod hodnoty v torrech na hodnotu v pascálech je dán definicí fyzikální atmosféry (též zvaná standardní atmosféra), která byla původně definována jako 760 mm rtuťového sloupce a na 10. konferenci CGPM byla definována jako 101 325 Pa, z toho vychází $1 \text{ torr} = 101325/760 \text{ Pa} \approx 133,322 \text{ 368 Pa}$.
QNX	Jedná se o název komerčního operačního systému reálného času unixového typu, používající mikrojádro.
TOF	Time of Flight. Měření doby průletu.
FIFO	First In First Out. Jedná se o zásobník, obvykle vyrovnávací paměť u elektronických přístrojů a zařízení, do které se průběžně zapisuje. Čtení probíhá v pořadí v jakém probíhal zápis. To znamená od nejstarších k nejnovějším informacím uloženým v daném zásobníku.

1. Úvod

Experimenty zaměřené na úplné fúzní reakce s pomocí urychlených ionů ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{50}Ti dopadajících na terč z ^{92}U až po ^{98}Cf vyústily v objev šesti nových prvků periodické tabulky s protonovým číslem $Z=113$ až $Z=118$, které patří do předpovězené oblasti tzv. ostrova stability s využitím Dubněnského plynem naplněného separátoru, dále jen DGFRS-I, a urychlovače U-400 [1,2,3,5,6]. Dalším krokem při objevování nových supertěžkých prvků bylo vytvoření experimentálního pracoviště nazvaného továrna na supertěžké prvky „[Super Heavy Elements Factory](#)“. Toto pracoviště se skládá z nového cyklotronu DC-280 a nového plynového separátoru DGFRS-II [3,4]. Projektovaná luminozita svazku z cyklotronu DC-280 je desetkrát vyšší¹ než doposud používaný cyklotron U-400 ve Flerovově laboratoři jaderných reakcí, dále jen FLNR, který se používal pro přípravu urychlených ionů pro objevy prvků s $Z=113$ až 118. Nový plynový separátor DGFRS-II má taktéž vyšší separační účinnost a dále lepší transmisivitu pro syntetizovaná supertěžká jádra. Díky této unikátní kombinaci je možné přistoupit k experimentům s fúzní reakcí a k přípravě teoreticky předpovězených prvků se $Z=119$ a $Z=120$. Toho bude dosaženo bombardováním terčů z ^{249}Bk a $^{249-251}\text{Cf}$ pomocí urychlených ionů ^{50}Ti i přes velmi nízký účinný průřez² (fb). [1,4]. Na obrázku 1 je fotografie sestaveného separátoru DGFRS-II uvedeného do provozu 9/2019 a připojeného k urychlovači DC-280 ve FLNR.



Obrázek 1 Sestavený separátor DGFRS-II. Montáž a systémová integrace v letech 2018-2020.

¹V případě urychlovače částic U-400 intenzita svazku urychlených ionů ^{48}Ca dosahuje až $7 \cdot 10^{12}$ pps.

V případě urychlovače částic DC-280 intenzita svazku urychlených ionů ^{48}Ca dosahuje až $5 \cdot 10^{13}$ pps.

²Z uvedených zdrojů pro představu například syntéza $Z=115$ (2003) DGFRS-I $2,7_{-1,6}^{+4,8}$ pb.

Princip fungování plynového separátoru DGFRS-I i DGFRS-II je založený na separaci výsledných produktů jaderné reakce v magnetickém poli a plynu. Syntéza supertěžkých prvků probíhá zjednodušeně tak, že urychlené iony z urychlovače v ideálním případě penetrují Coulombovou bariérou jádra terče. Pokud by byla energie ionů vstupujících do reakce příliš vysoká, složené jádro by nevydrželo. V ideálním případě dojde k úplné jaderné fúzi a vyrazení takového výsledného produktu z materiálu terče při ztrátě několika neutronů. Při tomto jevu se protonová a neutronová čísla sčítají a dostáváme mateřské jádro [1]. Účinné průřezy takovýchto reakcí se pohybují na úrovni pb až fb. Proto je při ozařování potřeba co nejvíce vybrat pouze reálná mateřská jádra vzniklá za terčem vstupující do objemu separátoru a co nejvíce potlačit štěpné produkty a výsledky jiných interakcí. Trajektorie nabitých částic pohybujících se od terče k detektoru je závislá na směru a intenzitě stacionárního magnetického pole a v případě, že prostor separačního magnetu je naplněn plynem, tak i na druhu použitého plynu a jeho tlaku. Dále hlavní separační dipól má výstupní trajektorii zalomenou pod úhlem a tím pádem nenabitě částice budou pohlceny interakcí s materiálem nebo budou pokračovat skrze materiál dále, nicméně mimo výstupní okénko a nevstoupí do detekčního systému. To ve výsledku zajišťuje nižší radiační zátěž detektorové komory i o několik řádů a snižuje nežádoucí pozadí zatěžující spektrometrické systémy. Nastavení intenzity magnetického pole zaostřovacích prvků a výběr pracovního plynu a jeho tlaku³ se vybírá tak, aby docházelo k co největšímu průchodu žádoucích prvků reakce, a magnetické čočky se zaostřují tak, aby veškeré žádoucí dopadající částice dopadly do plochy detektoru. Zde je využito spektrometrie na bázi křemíkových proužkových detektorů, dále jen DSSSD⁴. U těchto detektorů každý proužek představuje jeden spektrometrický kanál. Proužky jsou zepředu i zezadu detektoru na sebe kolmé a po fyzické implantaci jádra do povrchové vrstvy křemíku se z výstupních signálů dá určit poloha (souřadnice), čas dopadu a energie emitovaného záření. Křemík je vhodný pro svoje rozlišení okolo 30 keV FWHM⁵ a velký rozsah měření, zde 300 keV až 250 MeV bez nutnosti kryogeniky, jako například u High Purity Germanium (HPGe) detektorů.

³ Ustálené tlaky pracovního plynu se obvykle pohybují mezi 50 Pa až 300 Pa. Běžně okolo 100 Pa [1,2].

⁴ Oboustranný křemíkový proužkový detektor z anglického DSSSD (Double sided silicon strip detector). Detektor zhotovila firma Micron model BB17 obsahující 48 předních a 128 zadních aktivních proužků.

⁵ FWHM z anglického Full Width at Half Maximum značí běžně využívanou charakteristiku rozlišení spektrometrického řetězce nebo detektoru záření. Definována je jako pološířka spektrálního fotopíku v polovině jeho maxima vyjádřená v intervalu energie.

Kolem tohoto detektoru se nachází doplňkové bokové detektory. Pro vyšší geometrickou účinnost detekce právě implantovaných rozpadajících se mateřských jader, které se mohou teoreticky rozpadat do 4π prostoru, a pro časové korelace, které jsou schopny rozlišit nově implantovaná jádra od starých dlouhodobě žijících implantovaných jader, je těsně před detekční komorou umístěna proporcionální drátková komora.

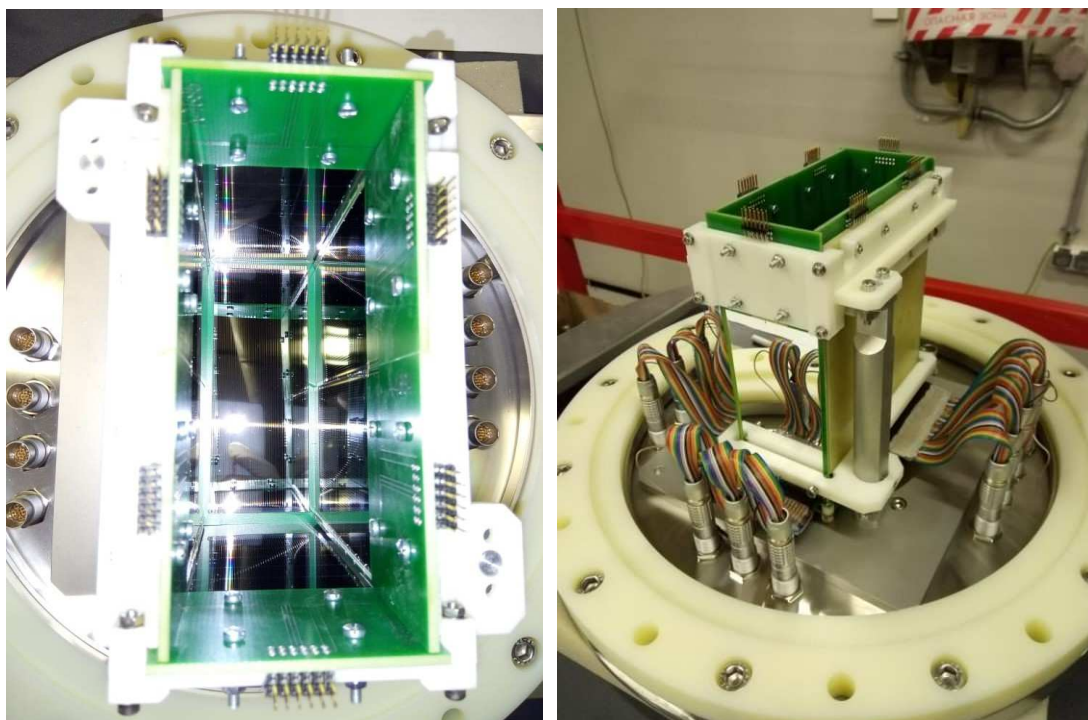
Běžící separátor DGFRS-I i DGFRS-II vyžaduje v pracovním režimu regulace průtoku plynu vodíku či helia definovaného tlaku pomocí PID regulace⁶. Dále se musí separátně zajišťovat potřebný tlak vzduchu v systému pro ovládání elektro-pneumatických aktuátorů oddělujících pracovní sekce v případě spouštění do provozu, havárie či výměně dílů a průtok vody v systému pro chlazení magnetů, turbomolekulárních vývěv a systému napájecích zdrojů.

Pro správnou funkci proporcionální drátkové komory zmíněné výše je zde zajištěn průtok pentanu definovaného tlaku pomocí PID regulace v detekční komoře. Objem komory s pracovním plynem pentanu i vodíku je oddělen okénkem z mylarové folie o plošné hustotě $0,2 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Čerpání objemů je provedeno sekčními suchými vývěvami a sekčními turbomolekulárními vývěvami pro dosažení počátečního vakua pro vyčištění separátoru před naplněním plynem nebo jeho záměnou. Tyto vývěvy dosáhnou vysokého vakua běžně o stupni 10^{-7} Torr až 10^{-8} Torr. Posléze je objem separátoru naplněn pracovním plynem obvykle se jedná o vodík nebo helium o tlaku okolo 1 Torr [1,2,4,6]. Jednotka Torr⁷ je dále využívána ve všech operátorských panelech a mechanických vakuometrech z důvodu zvyku dané experimentální skupiny. Detekční spektrometrická sestava čítá polovodičový proužkový detektor DSSSD doplněný o bokové detektory, jejichž konstrukci si lze představit jako kvádr bez vrchní stěny, která slouží jako otvor pro přilétající produkty syntézy a zbylá neodseparovaná jádra. Na obrázku 2 je otevřená detekční komora separátoru DGFRS-II, primární detekční část spektrometru.

⁶ PID regulátor patří mezi spojitě regulátory, složený z proporcionální, integrační a derivační části.

⁷ Platí: 1 torr = 1 mm rtuťového sloupce $\approx 133,322 \text{ Pa}$

Přesný převod hodnoty v torrech na hodnotu v pascálech je dán definicí fyzikální atmosféry (též zvané standardní atmosféra), která byla původně definována jako 760 mm rtuťového sloupce a na 10. konferenci CGPM byla definována jako $101\,325 \text{ Pa}$, z toho vychází $1 \text{ torr} = 101325/760 \text{ Pa} \approx 133,322\,368 \text{ Pa}$.



Obrázek 2 Konstrukce detekční komory DGFRS-II s detektorem DSSSD (vlevo) a křemíkovými bokovými proužkovými detektory (vpravo).

Metodologie detekce je popsána ve spoluautorském článku⁸ (příloha A). Speciální systém nastavený na práh detekce podle času a energie vyhodnocuje v reálném čase potenciálního kandidáta na supertěžký prvek metodou aktivních korelací, popsaných v uvedené publikaci z přílohy A. Pokud jsou daná kritéria naplněna, spektrometr pošle pokyn systému havarijního vypnutí signálem k zablokování svazku z urychlovače. Tím se zajistí měření bez pozadí způsobeném dopadajícím svazkem z urychlovače a štěpnými produkty vznikajícími při ozařování. Interval je možno definovat podle předpokládané doby detekce očekávané rozpadové řady (minimum 30 s až 5 a více minut). Navíc vyvinutý algoritmus průběžně monitoruje dění na spektrometru a automaticky prodlužuje daný interval přerušování svazku, dokud se nenabere dostatečná statistika (množství detekcí) anebo se signály z rozpadajících jader neztratí v šumu „pozadí“ elektroniky. Posléze je automaticky odblokován svazek na elektrostatickém deflektoru v místě injekce ionů do cyklotronu a experiment pokračuje dále, čekající na další kandidáty. Tyto principy jsou dobře popsány ve

⁸ Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., Schlattauer, L., & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045.

spoluautorských publikacích viz příloha B, příloha C, příloha D. Vývoj systému havarijního vypnutí autorem a jeho nasazení do provozu je uveden v kapitole 6.

Cílem této práce je prezentovat publikaci z úspěšného experimentu syntézy nového detekovaného izotopu ^{285}Fl a jeho příslušné rozpadové řady, na kterém se autor práce spolupodílel, viz kapitola 1.1, a která poskytne i vysvětlení technické realizace daného experimentálního pracoviště. Současně je cílem práce prezentovat nové přístupy v návrhu a realizaci některých podsystémů řízení a sběru dat u obou separátorů DGFRS-I a DGFRS-II. Konkrétně se jedná o autorem této práce navržené nebo spolu navržené podsystémy, které splnily kritéria pro nasazení do dlouhodobého provozu. Pro snadnou dohledatelnost a návaznost na projektové dokumentace a publikované vědecké zdroje jsou části práce ponechány v odpovídajících si jazycích. Toto je zvoleno také z důvodu snadné orientace mezi dokumenty a následnou lehčí dohledatelnost informací navazujících na prezentované celky.

1.1) Výsledky z provedeného experimentu $^{48}\text{Ca}+^{240}\text{Pu}$ v letech 2016-2017

Do této studie autor překládané práce přispěl zejména nasazením nového, vyvinutého systému automatického měření energie svazku urychlených ionů z urychlovače U-400. Měření probíhalo kontinuálně původními elektrodami vzdálenými od sebe 3680mm na stanovišti separátoru DGFRS-I, kde byl experiment prováděn. Systém byl přidán jako redundantní, a výsledky měření a automaticky generovaný elektronický deník byly nakonec použity pro vyhodnocení dat z experimentu, jelikož se ukázaly jako relevantní. Autor práce se aktivně účastnil dále uvedeného experimentu a během přípravy na něj mimo jiné prováděl odladění daného systému. Na následující straně je uvedena spoluautorská publikace výsledků daného experimentu publikovaná v časopise *Physical Review C*. Plný text publikace je uveden zde, jelikož části *I. Introduction* a *II. Experiment* dobře poslouží pro zorientování se v problematice, kterou se zabývá tato práce. Zároveň kapitola *III. Results* popisuje objev nového izotopu flerovia a jeho rozpadové řady a tudíž se jedná o zajímavé výsledky experimentální práce. Uvedený text poslouží jako přehledový článek k problematice syntézy supertěžkých prvků a jejich charakterizaci.

Představení daného systému automatického měření energie urychlených ionů z urychlovače U-400 a DC-280 zmiňovaného výše je v kapitole 3.

Neutron-deficient superheavy nuclei obtained in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction

V. K. Utyonkov,^{1,*} N. T. Brewer,² Yu. Ts. Oganessian,¹ K. P. Rykaczewski,² F. Sh. Abdullin,¹ S. N. Dmitriev,¹
 R. K. Grzywacz,^{2,3} M. G. Itkis,¹ K. Miernik,^{2,4} A. N. Polyakov,¹ J. B. Roberto,² R. N. Sagaidak,¹ I. V. Shirokovsky,¹
 M. V. Shumeiko,¹ Yu. S. Tsyganov,¹ A. A. Voinov,¹ V. G. Subbotin,¹ A. M. Sukhov,¹ A. V. Karpov,¹ A. G. Popeko,¹
 A. V. Sabel'nikov,¹ A. I. Svirikhin,¹ G. K. Vostokin,¹ J. H. Hamilton,⁵ N. D. Kovrizhnykh,¹ L. Schlattauer,^{1,6} M. A. Stoyer,⁷
 Z. Gan,⁸ W. X. Huang,⁸ and L. Ma⁸

¹Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980 Dubna, Russian Federation

²Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA

³Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA

⁴Faculty of Physics, University of Warsaw, PL-02-093 Warsaw, Poland

⁵Department of Physics and Astronomy, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee 37235, USA

⁶Faculty of Science, Palacký University, CZ-77147 Olomouc, Czech Republic

⁷Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94551, USA

⁸Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China



(Received 8 November 2017; published 30 January 2018)

We present new results from investigations of the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction at a projectile energy of 250 MeV. Three new decay chains of ^{285}Fl were detected with decay properties mostly consistent with those measured in earlier studies. An additional chain was observed where the nuclei may decay through energy levels different from those of the other six chains registered so far. The cross section of the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{285}\text{Fl}$ reaction was measured to be $0.58^{+0.60}_{-0.33}$ pb, which is a factor of about 4–5 lower than that measured in the previous experiment at 245 MeV beam energy [V. K. Utyonkov *et al.*, *Phys. Rev. C* **92**, 034609 (2015).], consistent with expectations. The origin of an additional chain consisting of a recoil, α particle, and fission event is analyzed. The assignment of 25 short-lived SF events observed in this experiment is also discussed.

DOI: [10.1103/PhysRevC.97.014320](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.014320)

I. INTRODUCTION

In this paper, we present the results of experiments aimed at the study of neutron-deficient Fl isotopes produced in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction and of their descendants. Synthesis of neutron-deficient nuclei and the study of the properties of superheavy nuclei (SHN) in a wider range of number of neutrons could help to clarify the stabilizing effect of the experimentally established neutron shell closure at $N = 162$ and the one predicted at $N = 184$. During sequential α decays of Fl nuclei, having neutron numbers $N = 170$ – 175 , descendant nuclei are formed, which are located closer to the $N = 162$ shell and even cross it in some decay sequences; thus, the stability of such nuclei is governed largely by the influence of this shell. The decay path involving nuclei with different neutron numbers may cause changes in structure that can manifest itself in the α -particle energy spectra and decay times. In addition, α -decay chains of the odd- N nucleus ^{285}Fl , the product of the $5n$ -evaporation channel of the studied reaction, could reach the domain of the known nuclei at $N \approx 162$, connecting the region of SHN to the nuclear mainland.

Of particular interest is the study of even-even nuclei whose decay properties, especially the probability of spontaneous fission (SF), are not distorted by the effect of the

odd nucleon. The results of the first experiment involving the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction were published recently [1]. In Ref. [1], two events consisting of recoil (R) followed by spontaneous fission with relatively high energy release and with a half-life $T_{1/2} = 2.8$ ms were observed at the 250-MeV ^{48}Ca bombarding energy and tentatively assigned to ^{284}Fl . Two additional R-SF events registered with lower SF energy values might also originate from ^{284}Fl , however, their assignment to $^{240,242,244\text{mf}}\text{Am}$ fission isomers cannot be excluded. With the observed lifetimes of these events and the partial α -decay half-life estimated from extrapolation of α -decay energy (Q_α) systematics for Fl isotopes (e.g., Fig. 6 in Ref. [1]), and the relationship between T_α and Q_α , we could expect an α -decay branch of about 20% for ^{284}Fl . Observation of this decay mode would be important for final identification of the even-even isotope ^{284}Fl through its characteristic α -decay energy. In addition, the registration of its descendant, ^{280}Cn , that presumably undergoes spontaneous fission, would be important for tracing the properties of SHN in the $N \approx 168$ – 170 region of nuclei that exhibit the lowest stability against spontaneous fission. For ^{280}Cn ($N = 168$) a further decrease of T_{SF} is predicted as observed for neighboring Cn isotopes with decreasing N , but not as much as in neighboring isotopes $^{282,284}\text{Cn}$ (see Ref. [2] and Fig. 5 in Ref. [1]). Experimental verification of this prediction could shed light on stability of neutron-deficient isotopes of Fl, Cn, and other nuclei in this region.

*utyonkov@jinr.ru

Therefore, the main goal of this study was the synthesis of even-even ^{284}Fl with ^{48}Ca energy of 250 MeV and potential observation of its α decay, followed by decay of ^{280}Cn . In addition, one might expect production of ^{285}Fl at this projectile energy; this could give additional evidence of observation of the $3n$ -evaporation channel by measuring the corresponding excitation function. Production of a new lighter Fl isotope, ^{283}Fl , at this beam energy seems to be less probable but cannot be completely excluded as well.

II. EXPERIMENT

The experiments were performed employing the Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) and using ^{48}Ca beams accelerated at the U400 cyclotron of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. The maximum beam intensity of ^{48}Ca ions was 1.1 particle μA . The beam energy was measured with a systematic uncertainty of 1 MeV by a time-of-flight system. In this experiment, we used the same ^{240}Pu target as in Ref. [1]. The target material was provided by Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (enrichment 98.97%, impurities of other Pu isotopes: 0.77% ^{239}Pu , 0.09% ^{241}Pu , and 0.17% ^{242}Pu) and JINR (enrichment 88.9%, impurities of other Pu isotopes: 7.7% ^{239}Pu , 1.4% ^{241}Pu , and 2.0% ^{242}Pu , according to later measurements). The average thickness of the target for ^{240}Pu was $0.39 \pm 0.04 \text{ mg/cm}^2$ for the mixed ORNL/JINR target material combined in the ratio 1/5. The material was electrodeposited as PuO_2 oxide onto 0.72 mg/cm^2 Ti foils. The laboratory-frame beam energy in the middle of the target layer was about 250 MeV. Taking into account the energy spread of the incident cyclotron beam, the small variation of the beam energy during irradiation, and the energy losses in the target, we calculated the resulting ^{288}Fl compound nuclei (CN) to have an excitation energy range of 40.4–45.2 MeV (with use of mass tables [3,4]), close to that used in the second experiment with ^{240}Pu at $E_{\text{lab}} = 250 \text{ MeV}$ in Ref. [1]. The total beam dose of ^{48}Ca particles was about 1.4×10^{19} .

Other experimental conditions, including the separator settings, detection system, electronics, and method of calibration of the detectors, were the same as in Ref. [1]. The transmission efficiency of DGFRS for $Z = 114$ evaporation residues (ER) was estimated to be $35 \pm 5\%$. The volume of the separator was filled by hydrogen at a pressure of about 130 Pa. This volume is separated from the detection system by a 0.2 mg/cm^2 Mylar foil. After separation from ^{48}Ca beam ions, scattered particles, and transfer-reaction products, the recoils passed through a time-of-flight (TOF) system, that consisted of two multiwire proportional counters (MWPCs) placed in pentane at a pressure of about 200 Pa and generated signals proportional to the energy losses (ΔE) of recoils in the counters and TOF signals, and were finally implanted in the detector. Facing the incoming recoils is a 48-mm-high by 128-mm-wide 0.3-mm-thick double-sided silicon strip detector (DSSD) manufactured by Micron Semiconductor, Ltd. (model BB-17) with 1-mm-wide strips, 48 on the front side and 128 on the back side, providing high position resolution for recoil-correlated decay sequences and thus reducing potential random events. The detection efficiency of the implantation DSSD, for α particles with $E_\alpha \approx 10 \text{ MeV}$ emitted from the implanted nuclei, was estimated

to be about 52%. This detector was surrounded by an array of six single Si detectors (MICRON model MSX-7200) each 0.5-mm-thick with an active area of 65 mm (along the DSSD edge) by 120 mm (perpendicular to the DSSD surface). The inclusion of the side detectors, as measured for ^{217}Th α activity produced in a calibration reaction $^{\text{nat}}\text{Yb} + ^{48}\text{Ca}$, increases the position-averaged detection efficiency for full-energy α particles from the decays of implanted nuclei to 85%. The DSSD was backed by a single Si-veto detector (MICRON MSX-62), of 0.5 mm thickness and 48 mm by 128 mm active size matching the respective DSSD area. It was used for the detection and rejection of signals from, e.g., high-energy charged particles (α , protons, etc.), which are produced in the reactions of projectiles with the DGFRS media and can pass through the separator without being detected by the ΔE and TOF system but can be recorded simultaneously in the DSSD and veto counters. The signals from all the detectors were processed by using linear MESYTEC preamplifiers. This Si-detector array was designed, assembled, commissioned off-line, and provided by ORNL.

The output signals from the preamplifiers were split into two branches. One of these branches was processed with analog electronics and used to facilitate a low-background detection scheme for the nuclei to be investigated, similar to that used in Ref. [1]. This detection scheme allows the beam to be switched off after the detection of an ER-like signal followed by an α -like signal; provided the latter one is registered by the focal-plane detector with full energy. Both signals should occur in the same front and back strips of the focal plane detector within preset energy intervals expected for implantation and decay of the parent and daughter nuclei $^{284,285}\text{Fl}$ – ^{277}Ds . Such a detection scheme provides registration of sequential decays of descendant nuclides with very low background. The second branch of split preamplifier signals was processed using a digital electronics system based on XIA Pixie-16 modules provided by ORNL (see Ref. [1] for more details).

Digital processing of DSSD signals allowed setting relatively low energy thresholds, of about 170 keV for the 48-mm-long front strips and about 430 keV for the 128-mm-long back strips. The full width at half maximum (FWHM) energy resolution of the implantation detector was 25–53 keV for back strips (54–87 keV for front strips), while the summed signals recorded by the side and implantation detectors had an energy resolution of 175–417 keV; the resolution progressively degraded after experiments with ^{240}Pu [1] and $^{249-251}\text{Cf}$ [5] performed with the same side detectors. In the $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$ calibration experiments, 61% of the SF events of ^{252}No were detected as two coincident fragments in the focal and side detectors, with an average measured total energy release $E_{\text{SF}} = 167 \text{ MeV}$ (5 MeV lower than in Ref. [1]) and a FWHM of SF energy distribution $w = 35 \text{ MeV}$. In addition, a long-lived SF activity remained in the same detectors after the experiment with a target containing $^{249-252}\text{Cf}$ isotopes [5]. These nuclei can be assigned to recoiled target isotopes of $^{250,252}\text{Cf}$ with $E_{\text{SF}} = 152 \text{ MeV}$ and $w = 31 \text{ MeV}$. The average counting rates of SF events with $E_{\text{SF}} > 80 \text{ MeV}$ and $E_{\text{SF}} > 130 \text{ MeV}$ were about 32 and 21 per day, respectively. For the nuclides in the decay chains of Fl isotopes we expect minimum energies of fission fragments of 130 and 160 MeV

for the fragments registered by the focal-plane detector only or simultaneously by the focal and side detectors, respectively.

III. RESULTS

In this experiment, performed at a ^{48}Ca beam energy of 250 MeV, we observed three decay chains of ^{285}Fl (Fig. 1). In the first experiment [1], carried out at the same ^{48}Ca energy but at a lower beam dose (4.7×10^{18}), only an upper cross section limit was determined for the $3n$ channel of the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction (≤ 1.3 pb).

The first decay chain of ^{285}Fl was observed when the low-background detection scheme was not switched on. In the third chain, the first two α decays were registered by the focal and side detectors with low energy release in the focal detector. The decay of ^{277}Ds was registered by digital electronics in the neighboring back strips 63 and 64 with low energy release in strip 63 (0.69 MeV). In the analog electronics branch, this energy lies below threshold (1.57 MeV for back strip 63). This resulted in measuring a lower total α -particle energy on the back side and the beam was not switched off. The same occurred for the α particle of ^{285}Fl (back strips 68 and 69) in the second chain. Here only the α decay of ^{281}Cn stopped the beam and decays of ^{277}Ds , ^{273}Hs , and ^{269}Sg were detected during a 5-min beam-off period set in this experiment (the pause was not prolonged manually).

In this second chain, the full-energy α particle of ^{277}Ds was not found. Only three events were observed crossing the front strip 8 and back strips 68 and 69 while the beam was stopped by an ER- α_2 sequence; all of them are shown in Fig. 1. The

probability of a random origin of an event with any energy in these strips within $\Delta t = 10$ ms is about 10^{-4} [6]. Thus, we assign the event registered by only the focal-plane detector, with energy of 0.6 MeV, to ^{277}Ds assuming that its α particle escaped the Si-box detectors. In the third chain, the SF event in front strip 21 and back strips 63 or 64 was observed about 1.8 h after the decay of ^{273}Hs (Fig. 1). Note, during the total 925-hour long experiment, only 39 SF events with $E_{\text{SF}} > 130$ MeV were found in front strip 21 and only one of them was detected in back strips 63 or 64 or simultaneously in both these strips (Fig. 1). Thus, we assign this event to ^{265}Rf because the probability of detection of a random SF event in these strips within $\Delta t = 2$ h was less than 3×10^{-3} . Between the decays of ^{273}Hs and ^{265}Rf , only one α particle with $E_{\alpha} > 7.8$ MeV was observed in the front strip 21 and back strips 63 or 64. In several parts of this experiment performed at the highest beam intensity during a total of about 40 h, we found 13 α -like events in the same strips and with $E_{\alpha} = 7.8$ –8.8 MeV. The probability to detect one or more random α -like events within two hours from the decay time of ^{273}Hs is thus rather large, 0.48. However, the probability that a random event with $E_{\alpha} = 8.3 \pm 0.5$ MeV precedes the SF of ^{265}Rf ($\Delta t = 1$ min) is about 5×10^{-3} allowing us to assign this event to ^{269}Sg .

For calculation of the expected number of random ^{285}Fl -like decay chains, we first estimated probable energy range ΔE_{ER} for ERs of ^{285}Fl . We used the measured ER energies in the three chains shown in Fig. 1 and those from Ref. [1] for which the average E_{ER} value plus/minus three standard deviations result in $\Delta E_{\text{ER}} = 4.6$ –15.1 MeV. This value is also in agreement with systematics of previously measured ER energies for nuclei

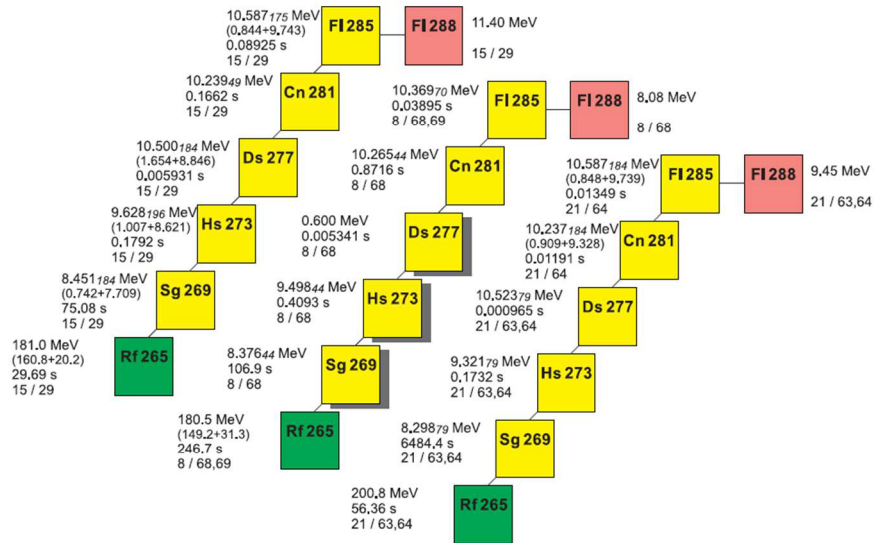


FIG. 1. Decay properties of ^{285}Fl and descendant nuclei observed in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction. The decay chains listed in the text as events 1, 2, and 3 are shown from left to right. The top right rows for each chain show ER (in pink) energies and strip numbers (front and back). The left rows provide energies, time intervals between events and their strip numbers for α decay (in yellow) and SF (in green). Energies of summed signals are given in parentheses. Three events marked with a shadow were registered during the beam-off period. The FWHM α -particle energy errors are shown by smaller italic numbers. For events detected with full energy in one or two back strips the resolution corresponds to back or front strips, respectively.

014320-3

synthesized in the U-Cf+⁴⁸Ca reactions as well as in various experiments with other projectiles carried out at DGFRS. During the 925-h ²⁴⁰Pu + ⁴⁸Ca experiment when the beam was on the target, the total number of sequences consisting of ER-like events with $E_{ER} = 4.6\text{--}15.1$ MeV and α_1 -like events with $E_\alpha = 10.4 \pm 0.5$ MeV detected within 0.5 s in the same front and back strips of the focal-plane detector was 543. The number of expected random ²⁸⁵Fl-like decay chains was calculated by multiplying the 543 ER- α_1 chains (namely, numbers of chains in each of the back strips) by the corresponding probabilities of detection of different events (α and SF) in the same strips assuming their random distribution over the front strips. The total number of random chains was calculated as a summed value for all of the back strips. The probabilities of detection of events were calculated as numbers of events (α -like events with one energy interval $E_\alpha = 8.2\text{--}10.7$ MeV and SF events with $E_{SF} > 130$ MeV) in each of the back strips divided by the duration of experiment (925 h) and the number of the front strips (48) and multiplied by the time interval Δt . The last value was chosen as 10 s for decays of ²⁸¹Cn–²⁷³Hs and 1000 s for ²⁶⁹Sg and ²⁶⁵Rf. Detection of events in chain 2 within the beam-off period was taken into account. For the first chain, the total number of random ²⁸⁵Fl-like decay chains N_{ran} was about 2×10^{-14} . For the second chain, an escape event of ²⁷⁷Ds was not taken into account, $N_{ran} < 2 \times 10^{-17}$. In the last case, the decays of ²⁶⁹Sg and ²⁶⁵Rf with lifetime of about 2 h were not taken into account as well, $N_{ran} < 4 \times 10^{-8}$. Thus, it is very unlikely that any of the three above decay chains of ²⁸⁵Fl are due to random correlation of unrelated events.

In addition to the three decay chains of ²⁸⁵Fl, one more chain was observed in this experiment. The ER-like signal with $E = 9.39$ MeV was followed in 12.21 s by an α particle with energies of 0.709 MeV and 8.804 MeV registered in the focal-plane and side detectors, respectively ($E_{tot} = 9.51 \pm 0.21$ MeV). In the next 0.0922 s, a fission event with $E =$

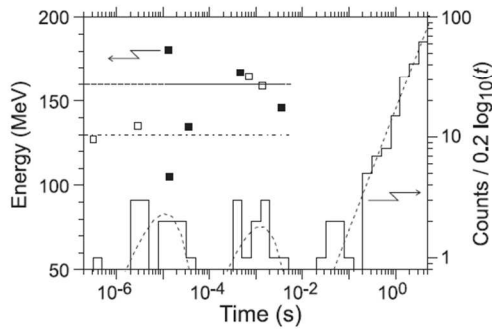


FIG. 2. Distribution of time intervals between SF events and all the preceding recoils (histogram, right scale). Short-dashed lines show exponential fits for decays with half-lives of about 10 μ s and 1 ms and linear fit for random ER-like events. Energies of SF events following ER-like signals, which fit the interval expected for ERs of ²⁸⁴Fl, are shown by solid and open squares for SF events registered by the focal and side detectors or solely by the focal detector, respectively (left scale, their expected lower energy limits are shown by long-dashed and dash-dotted lines, respectively).

195 MeV was detected by the focal (188 MeV) and side (7 MeV) detectors in the same front (38) and back (85) strips. No signals were observed between the ER-like event and the α particle in both these strips simultaneously. However, 17 low-energy signals ($E < 0.8$ MeV) were detected in the back strip 85 solely within this time interval; such signals could arise from an α particle escaping the focal detector. This chain is unlikely to originate from ²⁸⁵Fl. Despite the fact that the energy of the α particle is comparable with that of ²⁷³Hs, the ER- α time interval exceeds its lifetime by factor of 17, the probability of missing four α particles of ²⁸⁵Fl to ²⁷⁷Ds and ²⁶⁹Sg in one chain is very low, and the decay time of 0.09 s is much lower compared to lifetimes of ²⁶⁹Sg and ²⁶⁵Rf. The decay properties of nuclei in this chain also contradict those expected for ²⁸⁴Fl because the α -particle energies of the first three chain members ²⁸⁴Fl–²⁷⁶Ds should exceed the observed value of 9.5 MeV by about 1 MeV. The total number of such random chains was calculated similarly to that for ²⁸⁵Fl. But because of the unknown origin of this chain, we applied extended energy intervals for the recoil (2.5–18 MeV) and α event (8–11 MeV); the time intervals were chosen to be 20 s and 1 s for α and SF events, respectively. Nevertheless, the total number of random recoil- α -SF chains is about 4×10^{-3} . The possible origin of this chain will be discussed in Sec. IV.

TABLE I. Decay properties of short-lived SF nuclei observed in the ²⁴⁰Pu + ⁴⁸Ca reaction. The ER energy, decay time, and SF energy are shown for each chain. The ER and/or SF energies, which fall within intervals expected for implantation and fission of ²⁸⁴Fl are given in bold.

Event No	E_{ER} (MeV) - decay time (μ s)- E_{SF} (MeV) ^a	E_{ER} (MeV) - decay time (μ s)- E_{SF} (MeV) ^b	E_{ER} (MeV) - decay time (μ s)- E_{SF} (MeV) ^c
	~1-ms activity	~1-ms activity	~10- μ s activity
1	6.29-1376-159	5.43-3571-146^d	1.25-23-131 ^d
2	8.55-703-165	39.40-2370-184	11.06-13-180^d
3	12.02-468-167^d	3.41-1026-136 ^d	2.05-28-129
4		4.11-813-140	12.64-36-135^d
5		17.50-363-181	7.03-14-105^d
6		3.81-1359-169 ^d	2.62-12-169 ^d
7		1.66-1933-113	2.89-12-139 ^d
8		3.31-337-133	8.90-0.32-127
9			16.84-4.87-141
10			14.43-2.88-135
11			4.50-4.2-130
12			1.46-2-92
13			3.43-2-106
14			1.29-5-99

^aChains with decay time of about 1 ms, which could originate from ²⁸⁴Fl.

^bChains with decay time of about 1 ms, which could be assigned to ²⁸⁴Fl with lower confidence.

^cChains with decay time of about 10 μ s. The ER and/or SF energies of most of these events do not correspond to intervals expected for ²⁸⁴Fl.

^dFission events registered by both the focal-plane and side detectors.

Finally, in this experiment, we observed 25 short-lived SF nuclei. Since observation of fission isomers produced in transfer reactions with ^{240}Pu is quite expected [1], their fission energies should be lower than those of the nuclei with $Z \geq 104$, and they can reach detectors with broad distribution of energies of recoils, we searched for R-SF sequences in the recoil-energy interval of 0.3–50 MeV followed by fission fragments with energies larger than 90 MeV.

The distribution (number of events versus time interval in double logarithmic scale) for all such sequences within a 5-s time interval is shown in Fig. 2. In total, 755 chains were found within R-SF time interval of 20 s; 607 SF events were preceded by a single recoil. From 730 sequences with $\Delta t > 10$ ms it follows that about 0.15 chains could be random for $\Delta t = 0$ –4 ms. Decay properties of these 25 R-SF chains occurring within $\Delta t = 0$ –4 ms are given in Table I. These are separated into three groups. In the first group, three chains are given whose decay properties are in agreement with those expected for implantation and decay of ^{284}Fl . The next column contains sequences with properties, which fall out of the intervals chosen for ^{284}Fl . The last column includes short-lived SF nuclei with half-life of about 10 μs . Properties of all these decay chains except for two (Nos. 2 and 10) do not correspond to energy intervals assumed for ^{284}Fl . The possible origin of these events will be discussed in the following Sec. IV.

IV. DISCUSSION

In this experiment, three new decay chains of ^{285}Fl were observed, in addition to one chain identified at BGS in the $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)$ reaction [7] and three chains detected at DGFERS in the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ reaction [1]. The decay properties of most nuclei in the new chains are in agreement with previous observations. However, in one case (chain 3 in Fig. 1) the decay time of ^{269}Sg exceeds the average lifetime determined for the five other observed events by a factor of 33. The measured decay properties of ^{285}Fl and descendant nuclides are shown in Fig. 3. The properties of nuclei observed in the third chain in Fig. 1 are shown by filled squares. Time intervals corresponding to a detection probability of about 97% of decays are shown by horizontal lines. These intervals were calculated for half-lives estimated from 7 (^{273}Hs – ^{285}Fl) or 6 (^{265}Rf , ^{269}Sg) decays of nuclei (see Table II) and number of decays of 0.1 for time intervals below and above the given intervals. For all nuclei with the exception of ^{269}Sg , decays were observed within these intervals; only the decay time of ^{269}Sg in the third chain exceeds the upper limit calculated for all the six events. Despite the apparent difference in lifetimes for ^{269}Sg , the standard deviation of the logarithm of all the measured decay times is 1.54, which fits into the interval of 0.48–1.89 proposed in Ref. [8] for six exponentially decaying events. Thus, the available set of data does not provide a valid reason, which could confidently point out the inconsistency of the results obtained for ^{269}Sg in one of the seven decay chains. This behavior is not unexpected for statistically decaying nuclei.

However, one can see in Fig. 3 that decay times of nuclei in the considered chain are systematically lower than other lifetimes for all of the four isotopes ^{285}Fl , ^{281}Cn , ^{277}Ds , and

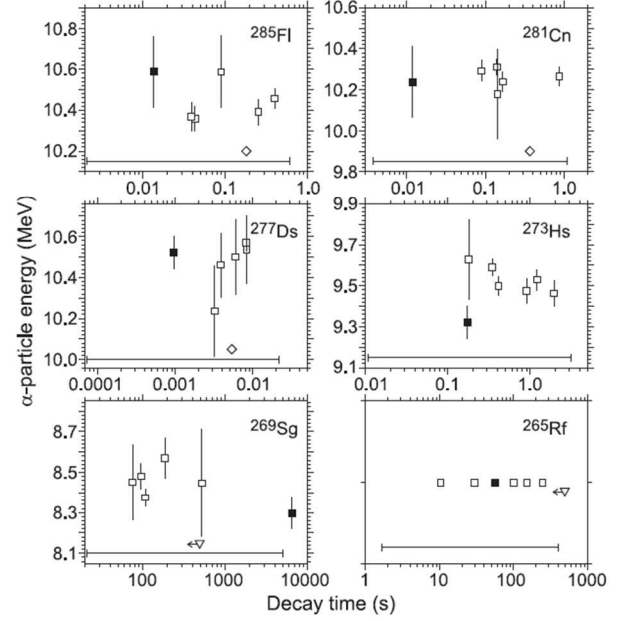


FIG. 3. Measured α -particle energies E_α (with error bars) vs. decay times of isotopes assigned to ^{285}Fl , ^{281}Cn , ^{277}Ds , ^{273}Hs , ^{269}Sg , and ^{265}Rf . For spontaneously fissioning ^{265}Rf , only decay times are shown. Decay properties of nuclei observed in the third decay chain in Fig. 1 are shown by filled squares. Time ranges for ^{269}Sg and ^{265}Rf in one chain with missing α decay of ^{269}Sg [1] are determined as intervals between decays of ^{273}Hs and ^{265}Rf and are shown by triangles with arrows (upper limits). Decay times for events with partially measured E_α values (full energy was not registered) are shown by diamonds on the bottom part of panels for ^{285}Fl [7], ^{281}Cn [1], and ^{277}Ds (this work). Time intervals corresponding to a detection probability of 97% of decays are shown by horizontal lines (see text).

^{273}Hs ; the energies of α particles are comparable for the first three nuclides and somewhat lower for ^{273}Hs . The lifetime of ^{269}Sg in this one chain is larger than those for other six decays and its α -particle energy is lower, but not much, than those in the other five cases. The decay times of ^{265}Rf are comparable in all the chains. Such a difference in the decay properties of nuclei for one of the seven chains might imply

TABLE II. Decay properties of nuclei produced in this work and from Refs. [1,7].

Nuclide	Decay mode	Half-life ^a	E_α (MeV) ^b	Q_α (MeV) ^b
^{285}Fl	α	$0.10^{+0.06}_{-0.03}$ s	10.41 ± 0.05	10.56 ± 0.05
^{281}Cn	α	$0.18^{+0.10}_{-0.05}$ s	10.28 ± 0.04	10.43 ± 0.04
^{277}Ds	α	$3.5^{+2.1}_{-0.9}$ ms	10.55 ± 0.04	10.70 ± 0.04
^{273}Hs	α	$0.51^{+0.30}_{-0.14}$ s	9.51 ± 0.04	9.65 ± 0.04
^{269}Sg	α	14^{+10}_{-4} min	8.41 ± 0.04	8.54 ± 0.04
^{265}Rf	SF	$1.1^{+0.8}_{-0.3}$ min		

^aError bars correspond to 68% confidence level.

^bThe energy uncertainties correspond to the data with the best energy resolution.

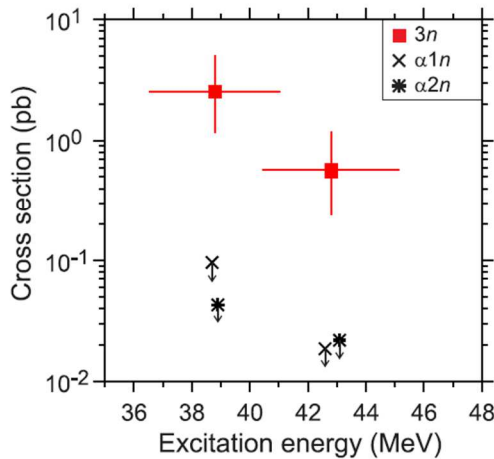


FIG. 4. Measured cross sections for the $3n$ -evaporation channel for the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction (red squares). Vertical error bars correspond to total (statistical and systematic) uncertainties. Horizontal error bars represent the range of excitation energies populated at the given beam energy. Cross-section maxima for the αn and $\alpha 2n$ channels estimated with use of different models discussed in the text are shown by \times 's and asterisks (see insert).

transitions through their different energy levels. However, the existing data do not allow us to make a definitive conclusion. The average decay properties of nuclei observed in this work and in Refs. [1,7] are given in Table II assuming single half-lives for all of the nuclei. However, it should be noted that in this case, the half-life of ^{269}Sg is markedly increased compared with the value $T_{1/2} = 3.1^{+3.7}_{-1.1}$ min given in Ref. [1]. As mentioned above, the probability that an event with energy of 8.30 MeV is random and does not belong to the isotope ^{269}Sg seems to be quite small, which allows us to assign it to this isotope. In addition, in this chain, the decay time of ^{265}Rf is consistent with the values observed in the remaining six chains of this nucleus. In any case, the aggregate decay time of the isotopes ^{269}Sg and ^{265}Rf in the third chain differs from the average value determined from the other chains by a factor of almost 20. In this regard, taking into consideration that the discussed chain could represent decay through a different nuclear level, we chose to give here the decay properties for the states in ^{269}Sg that follow from the third chain taken alone (that is, $T_{1/2} = 75^{+360}_{-35}$ min, $E_{\alpha} = 8.30 \pm 0.08$ MeV) and from the remaining chains ($T_{1/2} = 2.3^{+1.7}_{-0.7}$ min, $E_{\alpha} = 8.43 \pm 0.04$ MeV).

The cross section of the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ reaction at 250 MeV beam energy was measured to be $0.58^{+0.60}_{-0.33}$ pb (for the summary beam dose collected in Ref. [1] and this work, see Fig. 4). The given error bars include statistical as well as systematic uncertainties. In comparison with data from Ref. [1], an increase of ^{48}Ca energy of 5 MeV resulted in a decrease of the cross section of the $3n$ channel by a factor of about 4–5, which is in agreement with expectations for this evaporation channel (see, e.g., Fig. 4 in Ref. [9]). In the same figure, it can be seen that the production cross sections of the $4n$ -evaporation channel exceed those for the $3n$ channel at the excitation energy

of the compound nucleus $E^* = 40\text{--}45$ MeV in most reactions where both these channels were observed. Only in reactions with relatively neutron-deficient ^{243}Am is the yield of the $3n$ channel larger at $E^* = 40$ MeV and with ^{245}Cm the products of the $4n$ channel were not observed. Note that ^{240}Pu is the most neutron-deficient isotope ($N - Z = 52$) of all of the target nuclides used in reactions with ^{48}Ca and where products of complete fusion were unambiguously identified, except for ^{237}Np with a $N - Z = 51$.

For the product of the $4n$ channel, the even-even isotope ^{284}Fl , one expects SF as a dominant decay mode with high confidence. It follows from the dependence of T_{SF} on the neutron number for $^{282,284}\text{Cn}$ and ^{286}Fl isotopes, as well as from theoretical calculations [2] (see, e.g., Fig. 5 in Ref. [1]). In Ref. [1], using the measured half-life of two to four SF events, which we tentatively assigned to ^{284}Fl and comparing it with the partial α -decay half-life, which might be estimated from extrapolation of the α -decay energy Q_{α} systematics and relationship between T_{α} and Q_{α} , we estimated that ^{284}Fl could have about a 20% α -decay branch. α decay of ^{284}Fl was not observed in this experiment. Identifying new isotopes by SF decay properties is much more difficult compared with using α decay for several possible reasons. Among these are: the existence of long-lived SF activities in the detector from prior or current experiments and their random correlations with preceding ER-like events, the production of short-lived SF nuclides and SF isomers in transfer reactions and in reactions with emission of charged particles (pxn , αxn , etc.), relative yields of the latter may increase with increase of neutron deficit of target nuclei. All these sources of background may mimic decays of ^{284}Fl . Finally, the nonspecificity of fission complicates attribution of the observed SF to a particular nucleus.

The decay properties of the three nuclei in Table I (second column) are in agreement with those expected for ^{284}Fl . Their lifetimes are about 1 ms. The expected number of random ER-SF correlations due to longer-lived SF nuclides is rather low ($N_{\text{ran}} < 0.15$, see above). Unfortunately, the energies of fission fragments in these chains are relatively low and cannot be an argument in favor of this assignment. The cross section corresponding to production of one ER-SF event of ^{284}Fl in this experiment is about 0.26 pb. Eight more chains were observed with comparable lifetimes but with characteristics somewhat different from what we expected for the products of complete fusion (third column in Table I). All or part of them could originate from SF isomers $^{240,244\text{mf}}\text{Am}$ and $^{242\text{mf}}\text{Am}$, which decay with a half-life of about 1 ms and 14 ms, respectively [10]. Besides, several Pu and Am SF isomers with half-lives ranging within 1–73 μs ($^{237,239,241\text{mf}}\text{Pu}$, $^{238,241,243,244,245,246\text{mf}}\text{Am}$ [10]) could also reach the detectors. Their half-lives are comparable with those shown in Fig. 2 at $\Delta t_{\text{R-SF}} < 40$ μs and in the last column in Table I. For analysis of the origin of these R-SF chains one can consider data available for the $(\pm xn)$ - and $(+p \pm xn)$ -transfer reactions, which lead to Pu and Am SF isomers in the reaction with ^{240}Pu . In Fig. 5 (left panel), we show cross sections for production of Cf and Cm isotopes in the reactions of ^{86}Kr and ^{136}Xe heavy ions with ^{249}Cf and ^{248}Cm , respectively, vs. number of transferred neutrons ($\pm xn$). The cross sections for production

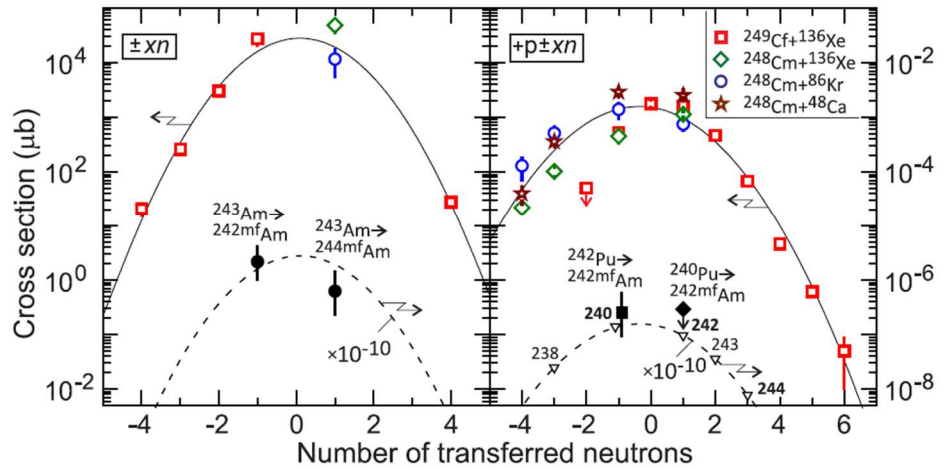


FIG. 5. Left: Cross sections for production of Cf isotopes in the $^{249}\text{Cf} + ^{136}\text{Xe}$ reaction [11] (red squares) and Cm isotopes in the reactions $^{248}\text{Cm} + ^{136}\text{Xe}$ [12] (green diamond) and $^{248}\text{Cm} + ^{86}\text{Kr}$ [12] (blue circle) vs. number of neutrons transferred to (positive values) or stripped from (negative ones) the target nuclei. Solid curve shows a Gaussian fit to these data. Cross sections (observed yield) measured at DGFRS for production of Am isomers with half-lives of 14 ms ($^{242\text{mf}}\text{Am}$) and 1 ms (assigned to $^{244\text{mf}}\text{Am}$) in the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ reaction at 248-MeV [13] are shown by black filled circles (right scale in μb). The dashed curve was obtained by shifting the upper fit curve down by a factor of 10^{10} . Note, production of $^{239\text{mf}}\text{Pu}$ and $^{241\text{mf}}\text{Pu}$ in the reaction with ^{240}Pu corresponds to the same number of transferred neutrons as that of $^{242\text{mf}}\text{Am}$ and $^{244\text{mf}}\text{Am}$ in the reaction with ^{243}Am . Right: The same as in the left panel but for production of Es and Bk isotopes in the reactions with ^{249}Cf and ^{248}Cm , respectively, vs. number of transferred neutrons ($+p \pm xn$). Data for the $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ reaction [14] are shown by brown stars. Production cross sections for $^{242\text{mf}}\text{Am}$ measured at DGFRS in the $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction at 244–250 MeV [15] and in this experiment, are shown by a black filled square and diamond, respectively. Expected yields of Am SF isomers in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction are shown by open triangles (see text). Atomic masses of isomers with $T_{1/2} > 0.1$ ms are given in bold.

of Es and Bk isotopes in the reactions of ^{48}Ca , ^{86}Kr , and ^{136}Xe with ^{249}Cf and ^{248}Cm ($+p \pm xn$), respectively, are shown in Fig. 5 (right panel). Projectile energies in these reactions correspond to about 1.07 times the Coulomb barrier [16], close to that in the $^{240}\text{Pu} + 250\text{-MeV } ^{48}\text{Ca}$ reaction. For conversion of these cross sections to yields of isomers, one should take into account the suppression factor of DGFRS for transfer-reaction products and isomeric ratio for SF isomers. Both these values are defined with large uncertainties.

However, the product of these values may be estimated from the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ [13] and $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ [15] experiments where several R-SF chains were observed and assigned to Am isomers. The measured yields of 14-ms ($^{242\text{mf}}\text{Am}$) and 1-ms (assigned to $^{244\text{mf}}\text{Am}$) activities in the first reaction at the excitation energy of 40 MeV are shown in the left panel in Fig. 5. The curve fitting the cross sections of the ($\pm xn$)-transfer reactions with ^{248}Cm and ^{249}Cf targets was scaled down by a factor of 10^{10} (dashed curve in Fig. 5). To obtain this somewhat arbitrary factor we assumed reasonable values for the isomeric ratio (3.3×10^{-4} [17]) and the DGFRS suppression factor for transfer-reaction products (3.3×10^6 , see, e.g., Ref. [18]). The observed yields of $^{242,244\text{mf}}\text{Am}$ are close to this reduced yield curve. Note, these Am isomers are produced in the same transfer reaction as $^{239\text{mf}}\text{Pu}$ and $^{241\text{mf}}\text{Pu}$ in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction. Similarly, the yield of $^{242\text{mf}}\text{Am}$ was measured in the $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction at 244–250 MeV projectiles [15]. Finally, the upper limit of the yield of $^{242\text{mf}}\text{Am}$ in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction can be estimated from nonobservation of 14-ms activity within the time interval of

3.6–23 ms (see Fig. 2) where more than 50% of its decays should be registered. Again, the yields of $^{240,242\text{mf}}\text{Am}$ agree with the curve obtained by shifting the fitting curve for the ($+p \pm xn$)-transfer reactions shown in Fig. 5 (right panel) by the same factor of 10^{10} .

In further analysis of the results, we assume that both the suppression factors of DGFRS for products of the low-nucleon transfer reactions and isomeric ratios for different nuclides produced in different reactions are close. However, the suppression factor can depend on target thickness, projectile energy, and separator settings; at the same time, the isomeric ratios could differ for the particular isomer, reaction type, projectile energy, etc. Nevertheless, the summary yield of SF isomers with half-lives of $\sim 1 \mu\text{s}$ to $73 \mu\text{s}$ expected from reduced curves in Fig. 5 could exceed the yield of the 1-ms $^{240,242,244\text{mf}}\text{Am}$ by a factor of about 17. If so, taking into account this factor and the number of R-SF events with $T_{1/2} \approx 10 \mu\text{s}$, one could expect observation of one decay of $^{240,244\text{mf}}\text{Am}$.

Another possible source of the 1-ms SF activity could be ^{282}Cn , the product of the $\alpha 2n$ reaction with ^{240}Pu . In this regard, the R- α -SF chain observed in this experiment should be discussed first. The decay properties of this chain are similar to the decay of ^{283}Cn ($E_\alpha = 9.53, 9.33, 8.94$ MeV [9,18,19]; $T_\alpha = 4.2^{+1.1}_{-0.7}$ s [9,18], $4.48^{+0.98}_{-0.68}$ s [19]) followed by SF of ^{279}Ds (SF branch $b_{\text{SF}} = 90\%$ [9,18], 85% [19]; $T_{\text{SF}} = 0.21 \pm 0.04$ s [9,18], $0.290^{+0.069}_{-0.047}$ s [19]). The chain in question could start from ^{287}Fl ($E_\alpha = 10.03$ MeV [9,18,19]; $T_\alpha = 0.48^{+0.14}_{-0.09}$ s [9,18], $0.54^{+0.17}_{-0.10}$ s [19]), the product of the $1n$ channel with ^{240}Pu , whose α particle was not registered

(see above). However, the products of the $1n$ channel were not observed in other ^{48}Ca -induced reactions with various actinide target nuclei [9,18]. One expects an even lower probability for this $1n$ -reaction channel at such high excitation energy of the compound nucleus ($E^* = 42.8$ MeV). But, despite the fact that the content of ^{242}Pu impurity in the JINR target material seems to be low (2.0%), the detection of one R- α -SF chain results in a production cross section of ^{287}Fl in the $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction of about 10^{+25}_{-9} pb, which does not contradict values measured for this reaction [15]. Thus, this chain could be caused by ^{287}Fl , the product of the $3n$ -evaporation channel of the reaction with ^{242}Pu impurity in the target.

Nevertheless, the potential αn channel for the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction leads directly to ^{283}Cn . The products of the αxn -reaction channels were never clearly observed in previous studies of the reactions of ^{48}Ca with actinide target nuclei. However, the lower mass number of the compound nuclei could lead to increased competitiveness of these channels compared to the xn channel (see, e.g., Ref. [20]). Unfortunately, existing theoretical models that describe fusion of heavy nuclei and further deexcitation of the compound nucleus are not sufficient to provide accurate quantitative results. To simplify the procedure, we omitted calculations of the first two steps of fusion-evaporation process—capture of interacting nuclei and following stage of formation of compound nuclei—and calculated only survival probabilities of the excited nuclei with respect to different channels. Then, using the calculated ratios between probabilities of the αxn and $3n$ channels and the measured cross sections of the $3n$ channel, we could estimate the cross section of the αxn channels.

In calculations of the ratios between the αxn and $3n$ channels we used three versions of a statistical model. One of them is the NRV statistical code of decay of excited nuclei [21,22]. Within this model, the fission barriers are calculated as a difference between the finite-range droplet barriers [23] and the shell corrections to the ground-state masses. These masses, necessary for calculating the particle binding energies, as well as the corresponding shell corrections are taken from Ref. [24]. In the second approach, calculations are performed within a framework of the statistical model realized with the HIVAP code [25]. The empirical masses [26] together with the liquid-drop (LD) finite-range ones [27] (for the nuclei not presented in Table [26]) are used for the calculations of the excitation and separation energies. Rotating LD fission barriers [28] are used in calculations together with shell correction energies (the difference between empirical and LD masses). Finally, in the third approach, the formation of the CN is described within a version of the dinuclear system model (see Ref. [29] and references therein). The deexcitation of the CN is treated with the statistical model using the level densities from the Fermi-gas model. The neutron, proton, and α -particle binding energies, the nuclear mass excesses of superheavy nuclei, and the ground-state microscopic corrections are taken from Ref. [27]. Within these three approaches, a satisfactory agreement was achieved in predicting and/or reproducing the ($^{48}\text{Ca}, xn$) excitation functions measured in the reactions with actinide target nuclei [29–31].

The ratios between probabilities of the αxn and $3n$ channels at $E^* = 43$ MeV vary within 0.001–0.03 and 0.01–0.04 for

the $\alpha 1n$ and $\alpha 2n$ channels, respectively. The estimated cross-section maxima for the $\alpha 1n$ and $\alpha 2n$ channels, namely, ^{283}Cn and ^{282}Cn , are shown in Fig. 4. Note, the yields of the αxn -reaction products are expected to be even lower due to reduced transmission efficiency of DGFRS for products of the αxn channels compared with that for the xn channels which was estimated to be about a factor of 4 [32,33]. This value follows from a Monte Carlo code [34] that allows simulation of angular and energy distributions of ERs at the exit from the target. Thus, it provides the input data for an ion-optical program [35] designed for tuning the separator and estimating the transmission and final yield of the reaction products in question. We also used a different Monte Carlo approach for calculating angular and energy distributions of ERs and their transmission through the DGFRS's diaphragm [33]. In this approach, the HIVAP code was used for calculating initial distributions inside a target and the TRIM code for the simulation of transmission of ERs through a target layer. These calculations gave essentially the same values of the suppression factors. The yield of the $\alpha 1n$ channel is expected to be lower than that of the $3n$ channel by a factor of 120–4000. Thus, assignment of the R- α -SF chain to the product of the $\alpha 1n$ channel does not look probable. Nevertheless, none of the three discussed sources of the R- α -SF chain can be excluded with certainty. Several factors prevent us from making definite conclusions; these are: observation of a single event only, somewhat long R- α time interval and large uncertainty of α -particle energy assigned to ^{283}Cn , which raises some concerns in identifying the parent nucleus, and possible uncertainties in the calculation of the DGFRS transmission for the αxn channels and cross-section ratios of αxn and xn channels.

Similarly, the product of the $\alpha 2n$ -reaction channel, ^{282}Cn (SF, $T_{1/2} = 0.91^{+0.33}_{-0.19}$ ms [9,18], $0.96^{+0.35}_{-0.20}$ ms [19]), could contribute to the 1-ms SF activity (see Fig. 2). However, taking into account predictions of the discussed models and the reduced transmission efficiency of DGFRS for the αxn -reaction products, the yield of ^{282}Cn at $E^* = 43$ MeV is expected to be lower by more than two orders of magnitude compared with that for the $3n$ channel. If contrary to the calculations, the R- α -SF chain originates from the $\alpha 1n$ channel, the observation of several decays of ^{282}Cn cannot be excluded.

In summary, three new decay chains of ^{285}Fl were observed in the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ reaction at 250-MeV ^{48}Ca energy. The decay properties of the observed nuclei are mostly in agreement with those measured in other chains, namely the one identified at the BGS in the $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)$ reaction [7] and three at the DGFRS in the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ reaction at lower energy [1]. The lifetime of ^{269}Sg observed in one chain exceeds that derived from other five decays by a factor of 33, which might indicate the observation of transitions through different levels in ^{285}Fl and descendants. The cross section of the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{285}\text{Fl}$ reaction was measured to be $0.58^{+0.60}_{-0.33}$ pb, which is lower by a factor of about 4–5 than the value measured at 245-MeV ^{48}Ca energy [1] and is in agreement with expectations for the $3n$ -evaporation channel.

One R- α -SF chain looks similar to the decay of ^{283}Cn followed by SF of ^{279}Ds . The chain could start in fact from ^{287}Fl , whose α particle was not registered, and be a product of the $1n$ channel of the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction or originate from

the $3n$ channel of the reaction of ^{48}Ca with ^{242}Pu impurity in the target. The $\alpha 1n$ -reaction channel leading directly to ^{283}Cn cannot be completely excluded as well. Of the above three possible sources of this chain, the reaction with ^{242}Pu impurity in the target appears to be the most reasonable.

More than 20 short-lived SF nuclei with lifetimes of about $10\ \mu\text{s}$ and $1\ \text{ms}$ were observed. Usually, identification of the spontaneously fissioning nucleus is not an easy task. Several sources of these activities were considered, namely, products of transfer reactions—spontaneously fissioning isomers $^{237,239,241\text{mf}}\text{Pu}$ and $^{238,241,243,244,245,246\text{mf}}\text{Am}$ ($T_{\text{SF}} = 1\text{--}73\ \mu\text{s}$) and $^{240,242,244\text{mf}}\text{Am}$ ($T_{\text{SF}} = 1\ \text{ms}$ and $14\ \text{ms}$) as well as products of the $\alpha 2n$ channel, ^{282}Cn ($T_{\text{SF}} = 1\ \text{ms}$), and $4n$ -evaporation product, ^{284}Fl . Comparison of the cross sections of several transfer reactions, which lead to products of the transfer/capture of neutrons solely ($\pm xn$) or together with transfer of proton to the target nucleus ($+p \pm xn$) with observed yields of SF activities was carried out, assuming similar suppression factors and isomeric ratios for discussed reaction products. From this analysis it follows that the most probable sources of the $\sim 10\ \mu\text{s}$ activity are isotopes $^{239\text{mf}}\text{Pu}$ ($T_{\text{SF}} = 7.5\ \mu\text{s}$) and $^{241\text{mf}}\text{Pu}$ ($T_{\text{SF}} = 20.5\ \mu\text{s}$) (see, e.g., 14 events in the last column in Table I). Their yields are expected to be larger than the total yield of $^{240,242,244\text{mf}}\text{Am}$ by a factor of about 17. Correspondingly, one could expect observation of about one decay of $^{240\text{--}244\text{mf}}\text{Am}$. The products of the αxn -reaction channels were not observed with certainty in previous studies of the reactions of U-Cf isotopes with ^{48}Ca , which is in agreement with combined analysis of the results of this experiment and calculations [21,22,25,29]. However, if the detected R- α -SF chain originates from ^{283}Cn , a potential product of the $\alpha 1n$ channel, then one may expect that several events of the product of the $\alpha 2n$ channel, ^{282}Cn , could contribute to the $1\ \text{ms}$ activity, e.g., those shown in column 3 in Table I. In addition, observation of several decays of ^{284}Fl (e.g., see column 2 in Table I) cannot be excluded as well. The observed decay properties would be in agreement with empirical systematics of the half-lives of even-even nuclides

$^{282,284}\text{Cn}$ and ^{286}Fl and predictions for T_{SF} of the isotopes of Ds-Og [2]. The number of observed events also would not contradict to the measured ratios between cross sections of the $3n$ and $4n$ -evaporation channels for the reactions with heavier Pu isotopes at the excitation energy of compound nucleus $E^* = 40\text{--}45\ \text{MeV}$ [9,18]. All of these considerations are valid for the results obtained in the first experiment with $^{239,240}\text{Pu}$ targets [1]. Here we should note that the unambiguous identification of ^{284}Fl still requires further studies, e.g., detection of the α -decay mode of ^{284}Fl , preferably with highly purified ^{240}Pu target material, or observation of ^{284}Fl as an α -decay product of the parent nucleus ^{288}Lv . However, taking into account the presumably low α -decay branch of ^{284}Fl and low production cross section of ^{288}Lv in any realizable reaction, these measurements call for performing experiments with noticeably higher sensitivity.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to express our gratitude to the personnel of the U400 cyclotron and the associates of the ion-source group for obtaining intense ^{48}Ca beams. The ^{240}Pu used in this research was partially supplied by the United States Department of Energy Office of Science by the Isotope Development and Production for Research and Applications Program in the Office of Nuclear Physics. These studies were supported by the Russian Foundation for Basic Research, including recent Grants No. 13-02-12052 and No. 16-52-55002. Research at ORNL was supported by the U.S. DOE Office of Nuclear Physics under DOE Contract No. DE-AC05-00OR22725 with UT Battelle, LLC. Research at LLNL was supported by LDRD Program Project No. 08-ERD-030, under DOE Contract No. DE-AC52-07NA27344 with Lawrence Livermore National Security, LLC. This work was also supported by the U.S. DOE through Grant No. DE-FG-05-88ER40407 (Vanderbilt University) and by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11661131003).

-
- [1] V. K. Utyonkov, N. T. Brewer, Yu. Ts. Oganessian, K. P. Rykaczewski, F. Sh. Abdullin, S. N. Dmitriev, R. K. Grzywacz, M. G. Itkis, K. Miernik, A. N. Polyakov, J. B. Roberto, R. N. Sagaidak, I. V. Shirokovsky, M. V. Shumeiko, Yu. S. Tsyganov, A. A. Voinov, V. G. Subbotin, A. M. Sukhov, A. V. Sabel'nikov, G. K. Vostokin, J. H. Hamilton, M. A. Stoyer, and S. Y. Strauss, *Phys. Rev. C* **92**, 034609 (2015).
 - [2] R. Smolańczuk, J. Skalski, and A. Sobiczewski, *Phys. Rev. C* **52**, 1871 (1995).
 - [3] Meng Wang, G. Audi, F. G. Kondev, W. J. Huang, S. Naimi, and Xing Xu, *Chin. Phys. A* **41**, 030003 (2017).
 - [4] W. D. Myers and W. J. Swiatecki, *Nucl. Phys. A* **601**, 141 (1996).
 - [5] N. T. Brewer *et al.* (unpublished).
 - [6] K.-H. Schmidt, C.-C. Sahn, K. Pielenz, and H.-G. Clerc, *Z. Phys. A* **316**, 19 (1984).
 - [7] P. A. Ellison *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 182701 (2010).
 - [8] K.-H. Schmidt, *Eur. Phys. J. A* **8**, 141 (2000).
 - [9] Yu. Ts. Oganessian and V. K. Utyonkov, *Nucl. Phys. A* **944**, 62 (2015).
 - [10] G. Audi, F. G. Kondev, Meng Wang, W. J. Huang, and S. Naimi, *Chin. Phys. A* **41**, 030001 (2017).
 - [11] K. E. Gregorich, K. J. Moody, D. Lee, W. K. Kot, R. B. Welch, P. A. Wilmarth, and G. T. Seaborg, *Phys. Rev. C* **35**, 2117 (1987).
 - [12] K. J. Moody, D. Lee, R. B. Welch, K. E. Gregorich, G. T. Seaborg, R. W. Lougheed, and E. K. Hulet, *Phys. Rev. C* **33**, 1315 (1986).
 - [13] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, *Phys. Rev. C* **87**, 014302 (2013).
 - [14] D. C. Hoffman *et al.*, *Phys. Rev. C* **31**, 1763 (1985).
 - [15] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, *Phys. Rev. C* **70**, 064609 (2004).
 - [16] R. Bass, in *Proceedings of the Symposium on Deep Inelastic and Fusion Reactions with Heavy Ions*, edited by W. von Oertzen, Lecture Notes in Physics, Vol. 117 (Springer-Verlag, Berlin, 1980), p. 281.

- [17] Yu. Ts. Oganessian, Yu. V. Lobanov, M. Hussonnois, Yu. P. Kharitonov, B. Gorski, O. Constantinescu, A. G. Popeko, H. Bruchertseifer, R. N. Sagaidak, S. P. Tretyakova, G. V. Buklanov, A. V. Rykhlyuk, G. G. Gulbekyan, A. A. Pleve, G. N. Ivanov, and V. M. Plotko, in *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Trends in Nuclear Physics*, edited by P. Kienle, R. A. Ricci, and A. Rubbino, 23 June–3 July, 1987, Varenna, Italy (CIII Corso, Soc. Italiana di Fisica, Bologna, 1989), pp. 258–281.
- [18] Yu. Ts. Oganessian and V. K. Utyonkov, *Rep. Prog. Phys.* **78**, 036301 (2015).
- [19] S. Hofmann *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **52**, 180 (2016).
- [20] D. Vermeulen, H.-G. Clerc, C.-C. Sahn, K.-H. Schmidt, J. G. Keller, G. Münzenberg, and W. Reisdorf, *Z. Phys. A* **318**, 157 (1984).
- [21] V. I. Zagrebaev, A. S. Denikin, A. V. Karpov, A. P. Alekseev, M. A. Naumenko, V. A. Rachkov, V. V. Samarin, and V. V. Saiko, NRV web knowledge base on low-energy nuclear physics, <http://nrv.jinr.ru/>
- [22] A. V. Karpov, A. S. Denikin, A. P. Alekseev, V. I. Zagrebaev, V. A. Rachkov, M. A. Naumenko, and V. V. Saiko, *Phys. At. Nucl.* **79**, 749 (2016); A. V. Karpov, A. S. Denikin, M. A. Naumenko, A. P. Alekseev, V. A. Rachkov, V. V. Samarin, V. V. Saiko, V. I. Zagrebaev, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **859**, 112 (2017).
- [23] A. J. Sierk, *Phys. Rev. C* **33**, 2039 (1986).
- [24] P. Möller, A. J. Sierk, T. Ichikawa, and H. Sagawa, *At. Data Nucl. Data Tables* **109-110**, 1 (2016).
- [25] W. Reisdorf, *Z. Phys. A* **300**, 227 (1981); W. Reisdorf and M. Schädel, *ibid.* **343**, 47 (1992).
- [26] G. Audi, A. H. Wapstra, and C. Thibault, *Nucl. Phys. A* **729**, 337 (2003).
- [27] P. Möller, J. R. Nix, W. D. Myers, and W. J. Swiatecki, *At. Data Nucl. Data Tables* **59**, 185 (1995).
- [28] S. Cohen, F. Plasil, and W. J. Swiatecki, *Ann. Phys. (N.Y.)* **82**, 557 (1974).
- [29] Juhee Hong, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, *Phys. Lett. B* **764**, 42 (2017); G. G. Adamian (private communication).
- [30] V. I. Zagrebaev and W. Greiner, *Nucl. Phys. A* **944**, 257 (2015).
- [31] R. N. Sagaidak, *EPJ Web Conf.* **21**, 06001 (2012); TAN11 presentation, Sochi, 2011 (unpublished).
- [32] A. G. Popeko, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **376**, 144 (2016).
- [33] R. N. Sagaidak, V. K. Utyonkov, and F. Scarlassara, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **700**, 111 (2013).
- [34] A. G. Popeko, O. N. Malyshev, R. N. Sagaidak, and A. V. Yeremin, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **126**, 294 (1997).
- [35] A. G. Popeko, O. N. Malyshev, A. V. Yeremin, and S. Hofmann, *Nucl. Instr. Methods Phys. Res., Sect. A* **427**, 166 (1999).

2. Monitorovací a řídicí systém DGFRS-I

Architektura řízení a sběru dat na separátoru DGFRS-I je postavena na modulárních přístrojích se společnou přístrojovou sběrnici CAMAC. Původní software, napsaný v jazyce C++, umožňuje nastavit a vizualizovat provozní parametry separátoru DGFRS-I. Součástí programu je i systém poplachů, jestliže některý z parametrů vyjde z předem nastaveného pracovního okna. Systém řízení a sběru dat DGFRS-I je možno nastudovat v [originále na příslušném odkaze](#)⁹. Tzv. úzké místo v návrhu tohoto řídicího systému je, že žádný klíčový prvek nemá redundantní okruh, a tudíž porucha jakéhokoliv článku vede k poruše celého řízení. Další nedostatek spočívá v nemožnosti zajistit deterministické zpracování povelů, resp. poruchových signálů. To je způsobeno hlavně povahou architektury řídicí aplikace, která je psaná na MS Windows XP SP2, kde je počítačový program přímo zodpovědný za zpracování daných stavových veličin a za vysílání povelů na technologické celky. Vzhledem ke zmíněnému, byl v modernizovaném řešení doplněn analogový systém, který porovnává fyzikální veličiny převedené na napětí a pokud dojde k výpadku nebo odklonění dané veličiny od zadaného pracovního okna, dojde k zablokování primárního svazku na stupni elektrostatického deflektoru urychlovače U-400. Tím urychlovač dočasně ztratí vstupní iony k urychlení po dobu trvání signálu blokace svazku. Pro počítačový program provádějící řízení se veškeré veličiny převádí z fyzikálních na elektrické. Viz tabulka 1.

(převzato od Sukhov A.M)

Parameter	Measurement method
Currents of the magnet and quadrupole lenses	Voltage → frequency
Rotation of the input window and the target (electric monitoring)	Drive output voltage → frequency
Rotation of the input window and the target (optical control)	Direct count of pulses of light-emitting-diode-photo-diode pair inside the controlled object
Pentane and hydrogen pressure in the time-of-flight module and the separator volume	Voltage (sensors MKS baratrons [11]) → frequency
Vacuum at different points	Output voltage (Pfeiffer sensors [12]) → frequency
Heavy ion beam current from the Faraday cylinder	Current → frequency
“Pentane–hydrogen” interface operation (yes/no)	ADC –5/+5 V
Temperature parameters	Voltage → frequency
Pressure of saturated pentane vapor in the output volume of liquid pentane	Voltage → ADC code (0–10 V)
Additional DC current parameters –5/+5 V	Voltage → code 7 ADC
Loads of the detector system and TOF module	Direct TTL pulse count
Current (with internal amplification) connected with the Faraday cylinder	Current → frequency

Tabulka 1. Převod fyzikálních veličin na elektrické signály při separátoru DGFRS-I

⁹ http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_5_2010/12_sukh.pdf

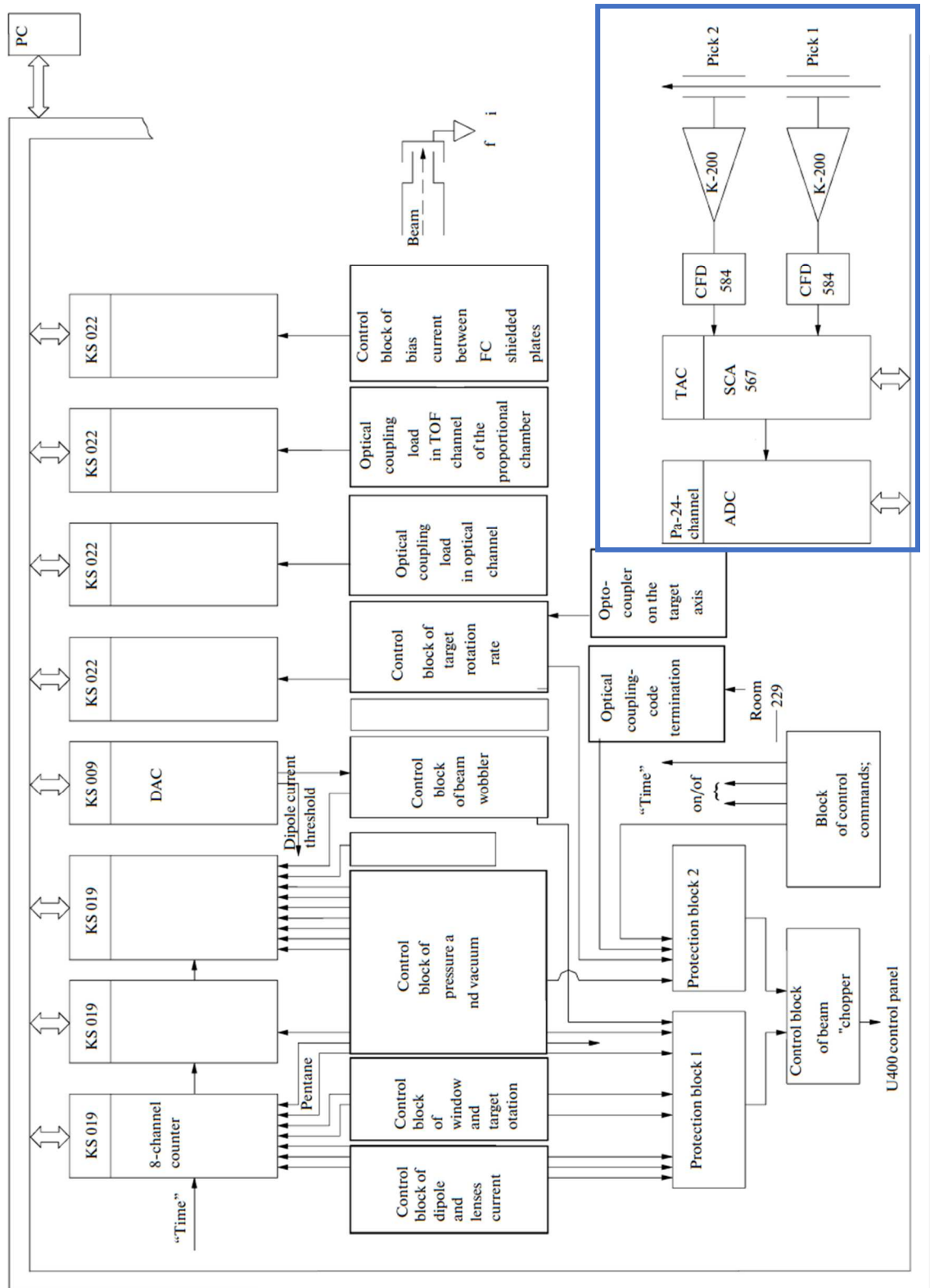
V rámci původního řešení je napětí převáděné na kmitočety a posléze čteno přes moduly čítačů v architektuře CAMAC. Konkrétně z modulů KS-022, KS-019. Vzhledem k absenci architektury řízení typu server – klient zde není snadná výměna dat mezi různými aplikacemi nebo není možné tyto veličiny vizualizovat pro ostatní uživatele. Dále vše běží na jednom běžném PC architektury x86 bez redundance na úrovni HW počítače. Vzdálené ovládání je umožněno pomocí distribuce video signálu a přenosu signálu pro klávesnici a myš pro dané místnosti a experimentální halu. Toto řešení je poněkud těžkopádné a poruchové, nicméně bylo na něm dosaženo veškerých úspěchů při syntézách prvků Z=113 až Z=118 [1,2,4,13].

Pro řízení pole separačního magnetu, fokusačních magnetických elementů a elektropneumatických aktuátorů pro oddělování vakuových sekcí a sekce s radioaktivním terčem, je zde třetí doplňkový systém dodaný oddělením automatizace FLNR na systému QNX¹⁰. Tento systém zcela vyhovuje požadavkům na řízení technologií, jelikož se jedná o operační systém reálného času s prioritizací přerušování procesů a možností definovat, co se stane, pokud daný proces není splněn v rámci definovaného časového rámce. Toto je implementováno již na úrovni jádra operačního systému, a tudíž je zajištěno deterministické chování jak PC, tak i aplikací běžících na daném operačním systému. Toto chování je typické pro automatizační programovatelné logické automaty. Zde ovšem s výhodou využití výpočetního výkonu PC. Vzhledem k původnímu systému navrženému s moduly, které se již nevyrábí a jsou založené na zastaralé součástkové základně, jsou opravy komplikované, nerentabilní a nespolehlivé, často pro nedostatek dokumentace. Předběžně je vedením laboratoře přijato, že dojde-li k modernizaci DGFRS-I a bude-li možnost takový systém navrhnout, bude se realizovat s využitím systémů na bázi NI LabVIEW, NI DSC¹¹ a NI cRIO podobným způsobem jako je prezentována úspěšná realizace pro separátor DGFRS-II v kapitole 5, na které se autor práce spolupodílel významnou měrou. V roce 2020 je experimentální pracoviště na dobu neurčitou v odstavce z důvodu plánované modernizace urychlovače U-400 a současného přesunu všech experimentů pro syntézu Z=115, Z=119 a Z=120 na modernější pracoviště DGFRS-II.

¹⁰ QNX je komerční operační systém reálného času unixového typu používající mikrojádro. Operační systém je unixového typu.

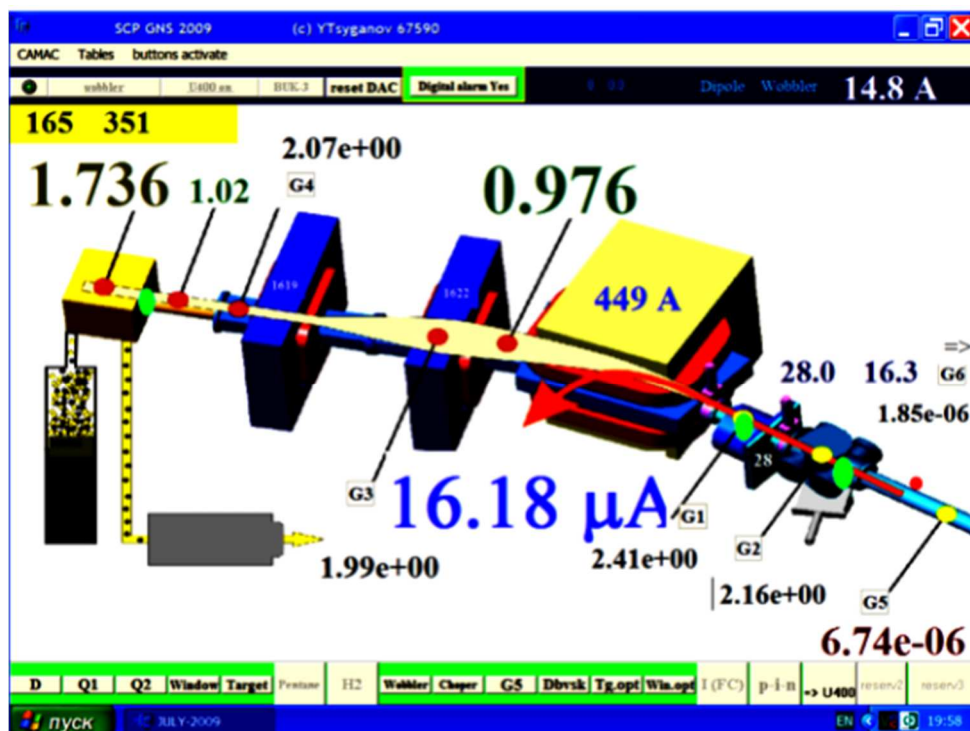
¹¹ Komerční balík Datalogging and Supervisory Control Module pro distribuované systémy. Umožňuje distribuci dat mezi různými počítači, servery, klienty a programovatelnými logickými automaty a technologiemi.

Obrázek 3 zobrazuje schéma provedení systému řízení DGFRS-I, které bylo doplněné o autorem vyvinutý systém měření energie svazku. Původní systém měření energie svazku v modrém rámečku byl zachován a k němu za předzesilovače K-200 (později VT-120) byl redundantně připojen nový systém, viz kap. 3.



Obrázek 3 Sběr dat a řízení experimentu DGFRS-I. Převzato od Sukhov A.M.

Na obrázku 4 můžeme vidět vizualizaci kontrolních a řídicích systémů DGFRS-I nakonfigurovaných podle schématu na obrázku 3. Součástí systému je možnost zapnout či vypnout alarm na pracovní okna jednotlivých technologických parametrů a zároveň je zde implementován elektronický deník technologických parametrů experimentu. Řízení proudu tekoucím magnetickým prvky se dělá za pomoci softwarového klienta jiného podsystemu na bázi operačního systému QNX, připojeného přímo do sítě dozorní urychlovače U-400.

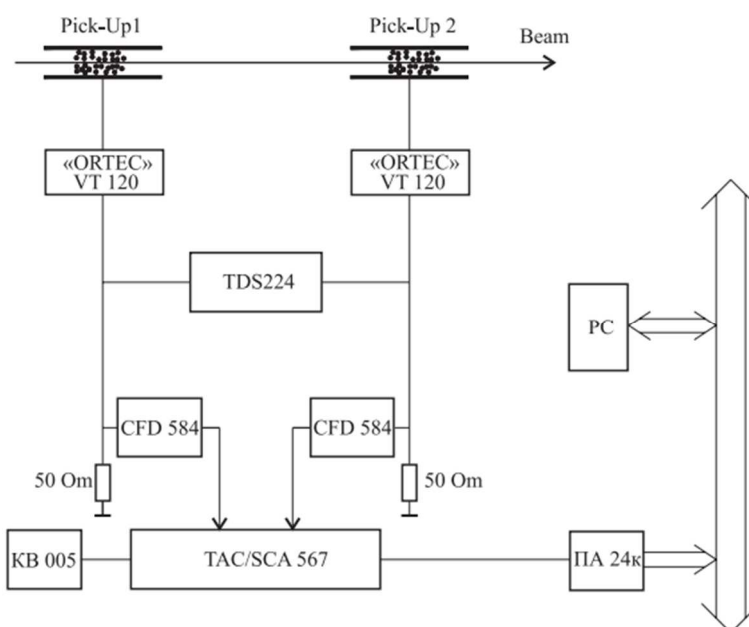


Obrázek 4 Grafické rozhraní řízení technologických parametrů separátoru DGFRS-I
Převzato od Tsyganov Y. Ts.

3 Systém měření energie svazku z urychlovače

Experimentální stanoviště DGFRS-I i DGFRS-II provádí srážkové reakce s fixním terčem a má vlastní měření energie urychlených ionů těsně před dopadem na reakční terč. Systém měření energie urychlených ionů z urychlovače U-400 probíhá na stanovišti DGFRS-I pomocí dvou elektrod¹² a pod systému *doby průletu*¹³.

Je zřejmé, že pohybující se iony proletí danou trajektorií za jednotku času. Z času a pevné vzdálenosti mezi elektrodami můžeme vypočítat rychlost, přičemž energie je svázaná s rychlostí. Všechny ostatní veličiny jsou pro daný výpočet konstantou. Iony urychlované na energie v rozsahu 100 MeV až 300 MeV již spadají svou rychlostí do oblasti, kde je třeba použít relativistickou korekci výpočtu. V současné době oba systémy, jak pro urychlovač U-400 stanoviště DGFRS-I, tak i pro urychlovač DC-280 stanoviště DGFRS-II, využívají relativistického výpočtu energie urychlených ionů dopadajících na radioaktivní terč. Pouze technická realizace se liší. V prvním případě pro stanoviště DGFRS-I se jedná o zapojení podle obrázku 5.



Obrázek 5 Schéma systému kontrolního měření energie svazku na stanovišti DGFRS-I

Převzato od Sukhov A.M.

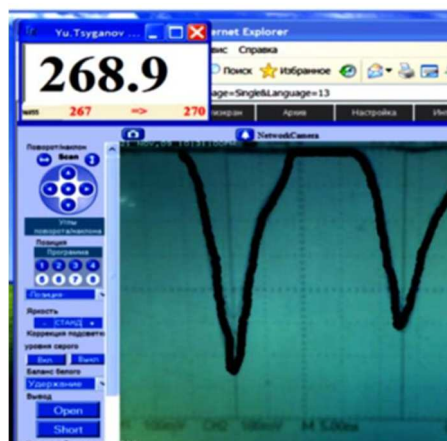
¹² Elektrody jsou od sebe 3680mm v případě DGFRS-I a 3238mm v případě DGFRS-II.

¹³ Dále jen jako zkratka TOF, převzato z anglického Time of Flight

Zde elektrody sbírající náboj vytvoří elektrický impuls zesílený předzesilovači Ortec VT120 na úroveň vhodné k přenosu přenosovou soustavou. Jedná se o řádově milivolyty až stovky milivolt při 5 puA z U-400 po zesílení. Tyto signály se poté rozvětví na osciloskop, pro:

- 1) Ruční měření pomocí kursorů a kontrolu kvality svazku pomocí vizualizace časového průběhu signálů z elektrod po předzesílení.
- 2) Moduly využívající metodu *constant fraction discrimination* (Ortec CFD 584 na obrázku 5).

Připravené signály je možno poslat do modulu ORTEC TAC/SCA 567, kde se měří časový rozdíl příchodu náběžných hran signálu. Výsledkem rozdílu je převod času na amplitudu. Jinými slovy, čím větší rozdíl v čase, tím větší amplituda. Výslednou amplitudu převedeme do číslcového tvaru pomocí AD převodníku PA 24k. Ten je společně s kontrolérem sběrnice CAMAC KK-12 připojen k PC, kde dochází k monitorování tvaru signálu pomocí IP kamery připojené do sítě, snímající obrazovku osciloskopu a zároveň uživatelský panel programu, který čte data z AD převodníku PA 24k a počítá dvakrát za sekundu střední hodnotu energie svazku. Videopřenos je též distribuován pro operátora urychlovače U-400, který na základě časového průběhu signálu nastavuje urychlovač pro ideální kvalitu svazku. Vizualizace a uživatelský panel takového řešení je zobrazen na obrázku 6.



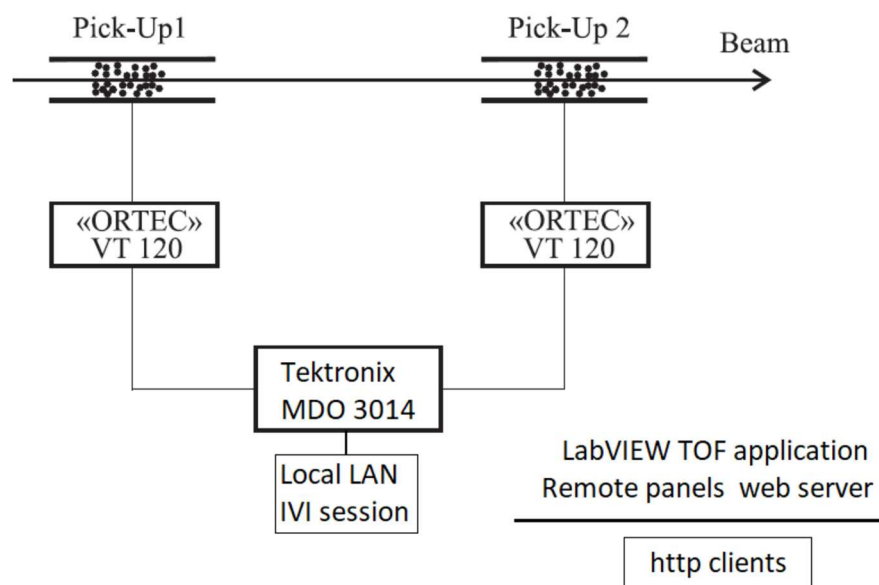
Obrázek 6 Automatické měření energie svazku DGFRS-I, původní systém, navrhnuo Sukhov A.M a Tsyganov Y. Ts. převzato od Tsyganov Y. Ts.

Daný systém má několik nevýhod:

- A) Kvalita zobrazení časového průběhu signálu je špatná, jelikož se jedná o videopřenos snímající obrazovku osciloskopu.
- B) Konverze z impulsů, kolikrát „nevalné“ kvality, pomocí modulů CFD 584 dává nejednoznačný signál, který modul TAC 567 občas spustí na náběžné hraně od energie, která se v daném svazku sice nachází, ale není převažující. Tím dochází k rychlým skokům v hodnotě zobrazené energie a při průměrování dochází k tomu, že střední hodnota je signifikantně posunuta od hlavní energie svazku.
- C) Je postaven na bázi modulárních přístrojů, které se již nevyrábí (KK-12, PA24k, KV005) a při poruše je nutno je opravovat a nelze jen zaměnit modul.

3.1) Nová technická realizace TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II

Z výše uvedených důvodů byl autorem práce navrhnut systém založený na platformě NI LabVIEW¹⁴, využívající stávající infrastrukturu. Změna v hardware byla pouhá záměna starého osciloskopu za modernější digitální Tektronix MDO3014 s podporou vzdálené konfigurace, čtení dat z paměti a ovladači pro programovací jazyk LabVIEW.



Obrázek 7 Navržený podsystém měření energie svazku na DGFRS-II

Z obrázku č. 7 je možno vyzorovat, že základní myšlenka měření energie svazku zůstala zachována. Stále zde využíváme metodu doby průletu (TOF), předzesílení signálů z elektrod pomocí osvědčených rychlých předzesilovačů ORTEC VT 120 a vizualizace časových průběhů signálů pomocí osciloskopu. Zde nicméně došlo k inovaci a záměně osciloskopu za osciloskop s podporou webového rozhraní, vzdáleného řízení, s ovladači konsorcia IVI¹⁵ kompatibilní s NI LabVIEW. Konkrétně se jednalo o osciloskop Tektronix MDO 3014. Tento osciloskop se vzorkovací rychlostí 5 GSaS má rozhraní USB i Ethernet, přičemž umožňuje plnou vzdálenou konfigurovatelnost, přístup do paměti přístroje na dálku aj. Na této myšlence byl vyvinut prototyp aplikace pro měření energie svazku založený na možnosti

¹⁴ NI LabVIEW je vývojové prostředí. Jedná se o grafický software pro návrh aplikací vyžadující testování, měření a řízení. Jedná se o otevřenou SW platformu umožňující jednoduchou integraci systémů třetích stran (zdroje, multimetry, převodníky, atd.). LabVIEW je celosvětovým standardem pro měřicí systémy.

¹⁵ Nadace na sjednocení příkazové sady na řízení přístrojů. Lze přeložit jako záměnný virtuální přístroj z anglického: Interchangeable Virtual Instrument (IVI).

konfigurovat přístroj jak ručně, tak na dálku, a zároveň umožnit výměnu dat mezi osciloskopem, serverem, na kterém běží aplikace pro výpočet a jejími klienty, kterými jsou pult urychlovače a dozorný.

Vzhledem k faktu, že na impuls z elektrody při částici ^{48}Ca i ^{50}Ti připadá přes 100 bodů z AD převodníku osciloskopu¹⁶ a časový průběh se blíží limitně Gaussově funkci, je zřejmé, že je dodržen vzorkovací teorém. Tento návrh byl autorem této práce zrealizován a úspěšně nasazen do praxe.

3.2) Výměna dat a reálná data

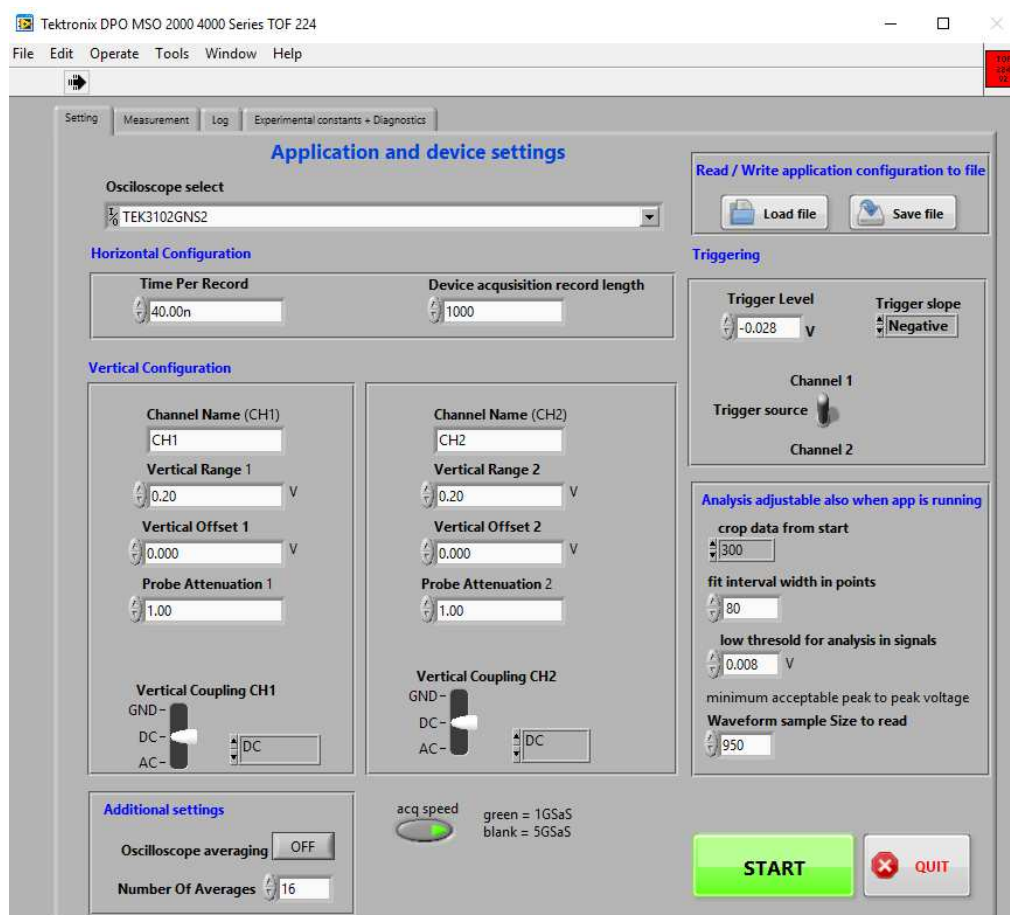
Výměna dat probíhá mezi osciloskopem po síti Ethernet a serverem, na kterém běží NI LabVIEW s aplikací pro měření energie. Ovladač byl využit TKDPO4k, který spadá do NI IVI univerzálních ovladačů pro osciloscropy Tektronix série 3000 a 4000. Ovladač umožňuje pomocí vzdáleného řízení nastavit všechny parametry zpracování signálu, jako jsou nastavení vertikální osy, horizontální osy, průměrování, spouštění a úroveň spouštění apod. Osciloskop je nastaven na 100 000 bodů akvizice, které drží v průběžné FIFO¹⁷ paměti. Tuto paměť v omezené míře pro snížení toku dat a zatížení systému osciloskopu lze přenášet jen z části. Dostatečné by bylo při 5 GSaS brát výřez okolo 500 bodů. Což dává výřez v časové ose cca 100 ns a zatížení sítě včetně redundance pro komunikaci cca 200 kb/s při zajištění bezproblémové odezvy osciloskopu na povely na předním panelu přístroje. Při čtení plné paměti byl uživatelský komfort významně omezen a prodlevy dosahovaly 1 až 3 sekundy. Vzhledem k tomu, že signály ze sběrných elektrod jsou vždy v intervalu 10 ns až 40 ns, tak je při správně nastaveném spouštění osciloskopu zaručeno, že TOF signály jsou vždy v pracovním okně.

¹⁶ Rychlost AD převodníku je 5 GSaS na straně osciloskopu. Vedení mezi předzesilovačem a osciloskopem je pro obě větve stejné délky a je kompenzováno na odrazy pomocí impedančního přizpůsobení. Tvar signálu je závislý na geometrické konstrukci elektrod a rychlosti přeběhu daného zesilovače VT120. Vzhledem k faktu, že pozorujeme rozdíl času mezi signály, je možné přetvarování zesilovačem zanedbat do té míry, dokud dává jednoznačný signál zpracovatelný dále. Teplotní stabilita zesilovače je řešena temperováním místnosti na stálou teplotu. I při teplotním driftu se předpokládá, že oba signály se změní stejně a výsledný rozdíl minimálních časových průběhů bude stále nula.

¹⁷ Z anglického first in first out – první dovnitř první ven je druh zásobníku dat v tomto případě průběžná paměť, která se plní vzorky z AD převodníku osciloskopu. Ovladač přistupující z vnější sítě do této paměti čte data z dané paměti od nejstarších po nejnovější.

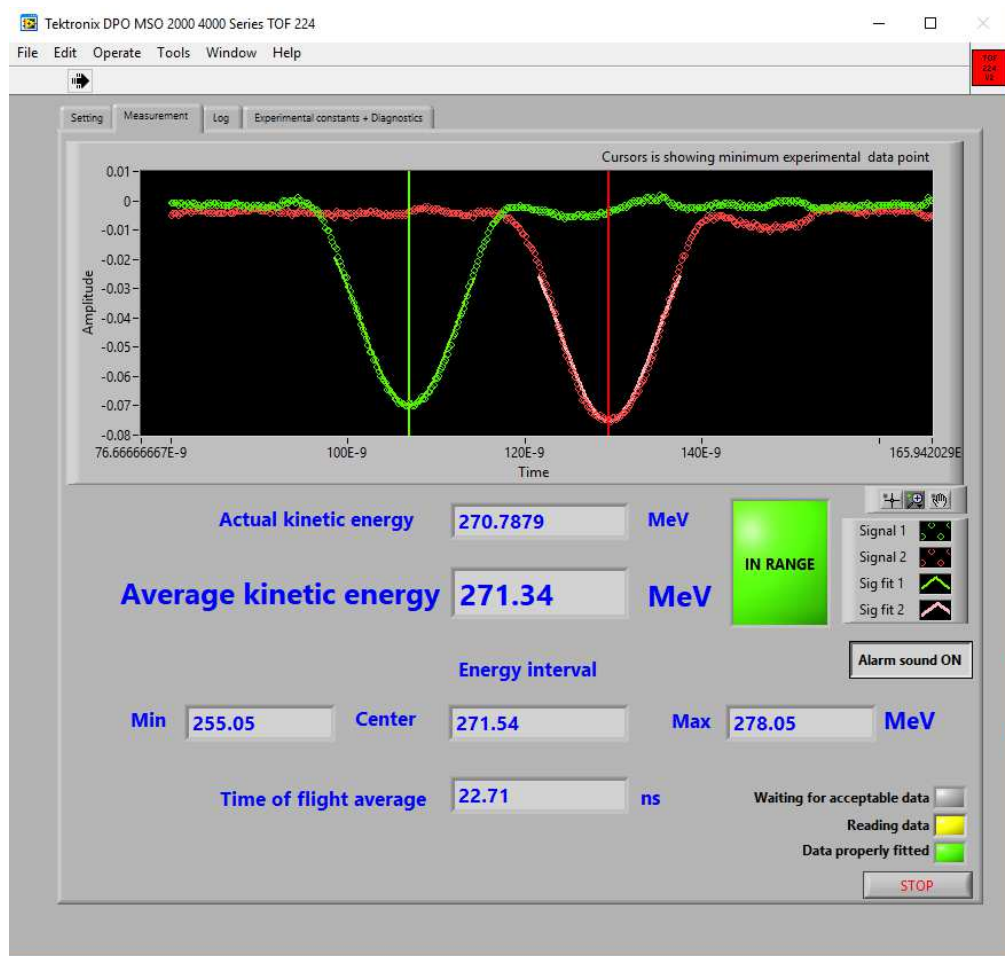
3.3) Vyvinutý SW + NI webserver + LV DSC + integrace do celku

Vyvinuté řešení zahrnuje hlavní aplikaci, která běží na hlavním serveru DGFRS-II pro řízení experimentu. Ten je zároveň zodpovědný za distribuci proměnných (hodnot parametrů) pro řízení celé experimentální haly DGFRS-II i komunikace s klienty (dozorna, pult operátora urychlovače). Výměna dat probíhá za pomoci tzv. sdílených proměnných na bázi NI DSC. Tato aplikace se spouští po startu počítače a zahrnuje možnost upravit vzdálenou konfiguraci osciloskopu po spuštění pro případ změn. Pokud do 3 sekund po spuštění programu nebo serveru uživatel neprovede jakoukoliv akci, program sám zašle osciloskopu vzdálené nastavení a přepne se do režimu měření, kdy očekává platné signály ze sběrných elektrod. Elektronický deník a předávání vypočítaných dat se píše právě tehdy, pokud měřená energie je nenulová. Obrázek 8 znázorňuje čelní panel podsystému pro vzdálené nastavení parametrů osciloskopu.



Obrázek 8 Čelní panel podsystému pro vzdálené nastavení parametrů osciloskopu.

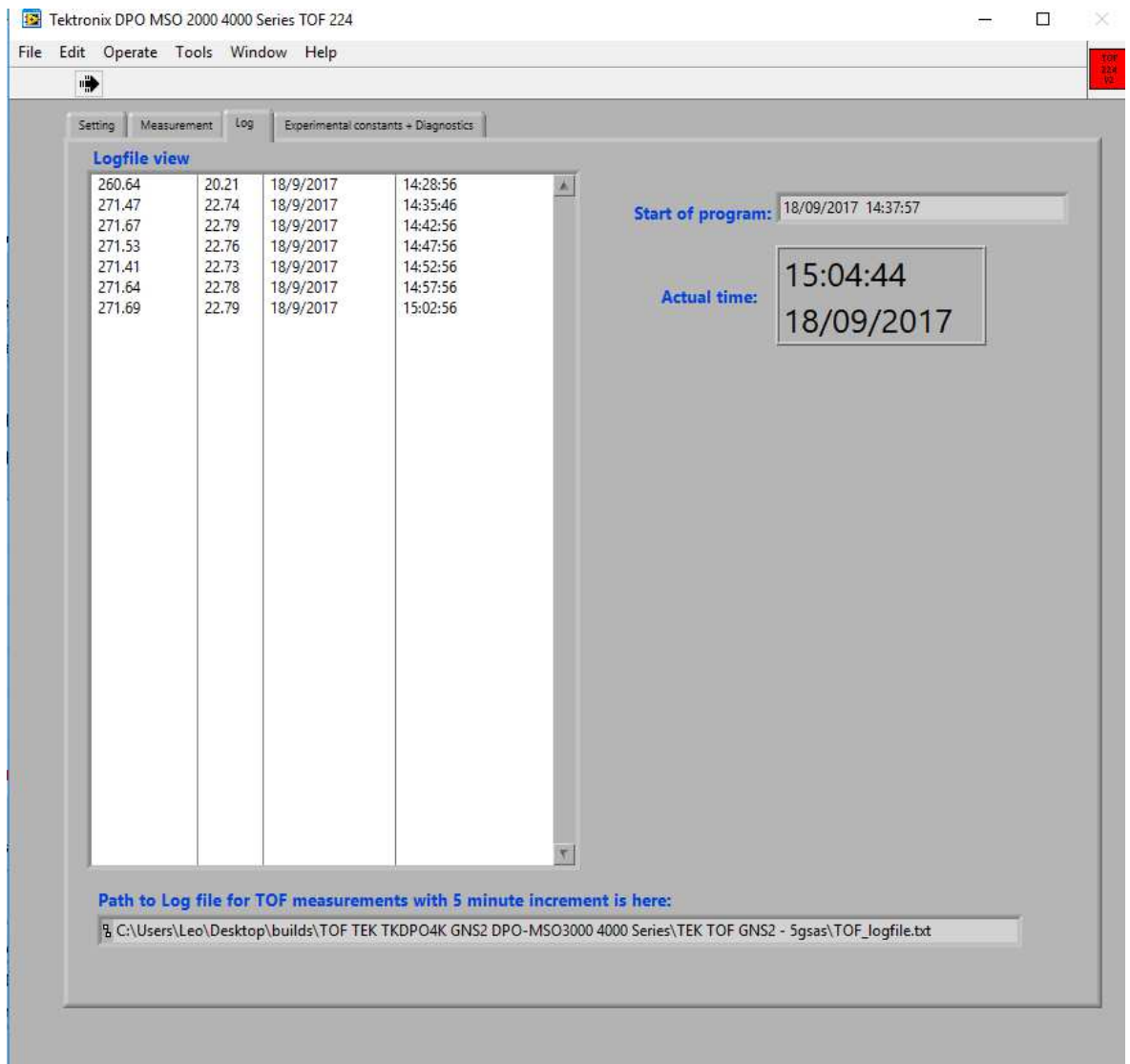
Parametry vzdáleného nastavení osciloskopu podsystému TOF na DGFRS-II jsou čteny po spuštění automaticky z konfiguračního souboru. Tato konfigurační záložka se používá pouze pro změny v konfiguraci. Například pokud se více jak o dva řády změní amplituda signálu vlivem jiných experimentálních požadavků na řádově jinou luminositu svazku z U-400 nebo DC-280. Aplikace v běžném provozním režimu s validními signály, které prošly automatickou inspekcí, je zobrazena na obrázku 9.



Obrázek 9 Čelní panel provozního stavu měření energie svazku TOF na serveru.

Na obrázku 9 vidíme aplikaci za provozu, kde výpočet probíhá kontinuálně (on-line). Při experimentu uvedeném v kapitole 1.1. bylo použito průměrování na straně osciloskopu 8x. Dále byl počítán klouzavý průměr ze sta měření pomocí průběžného FIFO zásobníku naměřených hodnot z osciloskopu. Směrodatná odchylka měření byla ± 1 MeV od ustáleného stavu urychlovače U-400 při energii 250 MeV během 24 h. Kontrolní nezávislé měření spadalo do nejistot vystavení energie svazku přímo na urychlovači U-400.

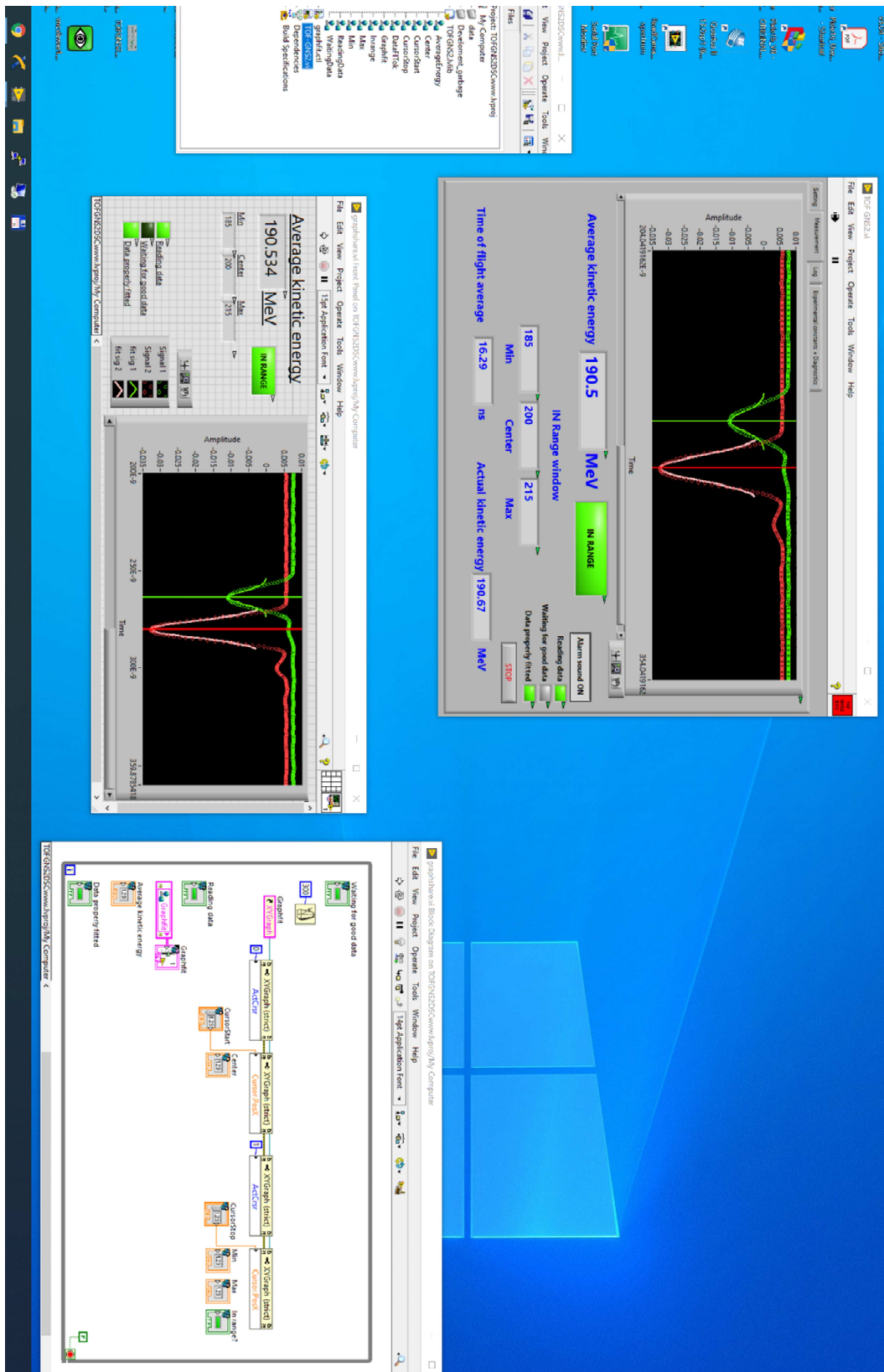
Dále byla provedena validace aplikace pomocí dvojí kontroly, kde výpočet proběhl odečtením z displeje osciloskopu a dále ručním výpočtem. Validní data zapisuje ve formátu ASCII elektronický deník aplikace a průběžná uložená data je možno za běhu aplikace prohlížet na čelním panelu zobrazeném na obrázku 10.



Obrázek 10 Aplikace měření energie svazku - zápis dat.

V zadání projektu bylo provádět zápis dat každých 5 minut. Soubor s deníkem je ve formátu ASCII a obsahuje vše, co je uvedeno v bílém poli tabulky aplikace. Současně se údaj o velikosti energie svazku přenáší do aplikace pro kontrolu parametrů separátoru, kde, pokud daný parametr vyjde z pracovního okna, bude spuštěn vizuální i hlasový alarm. Zároveň je přenášén i tvar signálu pro vizuální kontrolu kvality nastavení urychlovače jak pro potřebu hlavního experimentátora, tak pro operátora urychlovače. Obrázek 11 ilustruje klienta, který

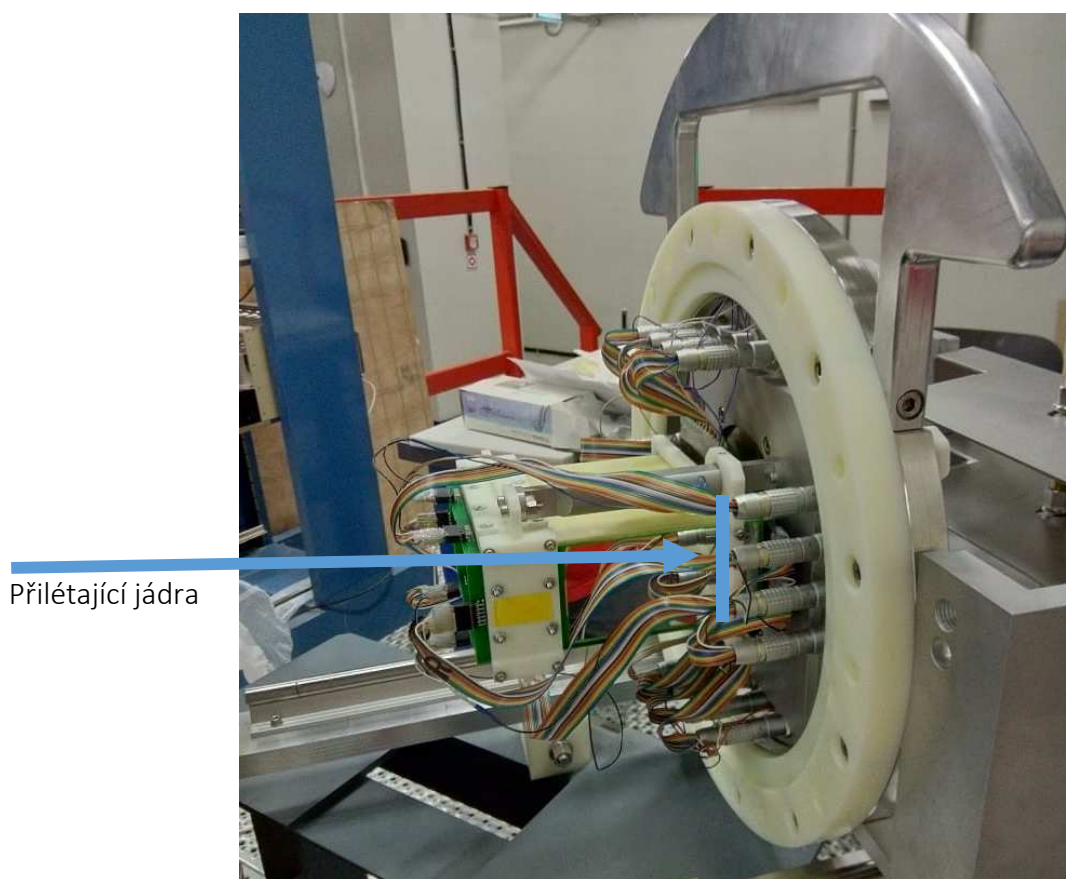
se vzdáleně připojuje pomocí sdílených proměnných balíku National Instruments Datalogging and Supervisory Control Module k hlavní aplikaci, která běží na serveru DGFRS_HOST, jež řídí celý DGFRS-II.



Obrázek 11 Vyvinutá univerzální aplikace TOF včetně vzdáleného klienta.

4. Spektrometrie na DGFRS-II

Spektrometrie stanoviště DGFRS-II vychází z 30 let zkušeností se syntézou supertěžkých prvků na DGFRS-I [1,2]. Během let 2017-2019 došlo k zakoupení a realizaci i částečným modifikacím a změnám projektu spektrometrie pro separátor DGFRS-II, který vznikl jako návazný klon spektrometrie DGFRS-I s dílčími inovacemi představenými ve spoluautorských publikacích, viz přílohy A,B,C,D,E a jejich reference. Tato kapitola je zde uvedena pro obecný popis, veškerá odborná data jsou uvedena v daných publikacích anebo budou publikována po ustálení konfigurace všech, jak HW, tak SW, částí řetězce. Detekční spektrometrická sestava čítá polovodičový proužkový detektor DSSSD¹⁸ doplněný o bokové detektory, jejichž konstrukci si můžeme představit jako kvádr bez vrchní stěny (pohled ze strany přilétajících jader viz obrázek 2). Chybějící stěna kvádru slouží jako otvor pro přilétající produkty syntézy a zbylá neodseparovaná jádra. Na obrázku 12 je otevřená detekční komora separátoru DGFRS-II, primární detekční část spektrometru.

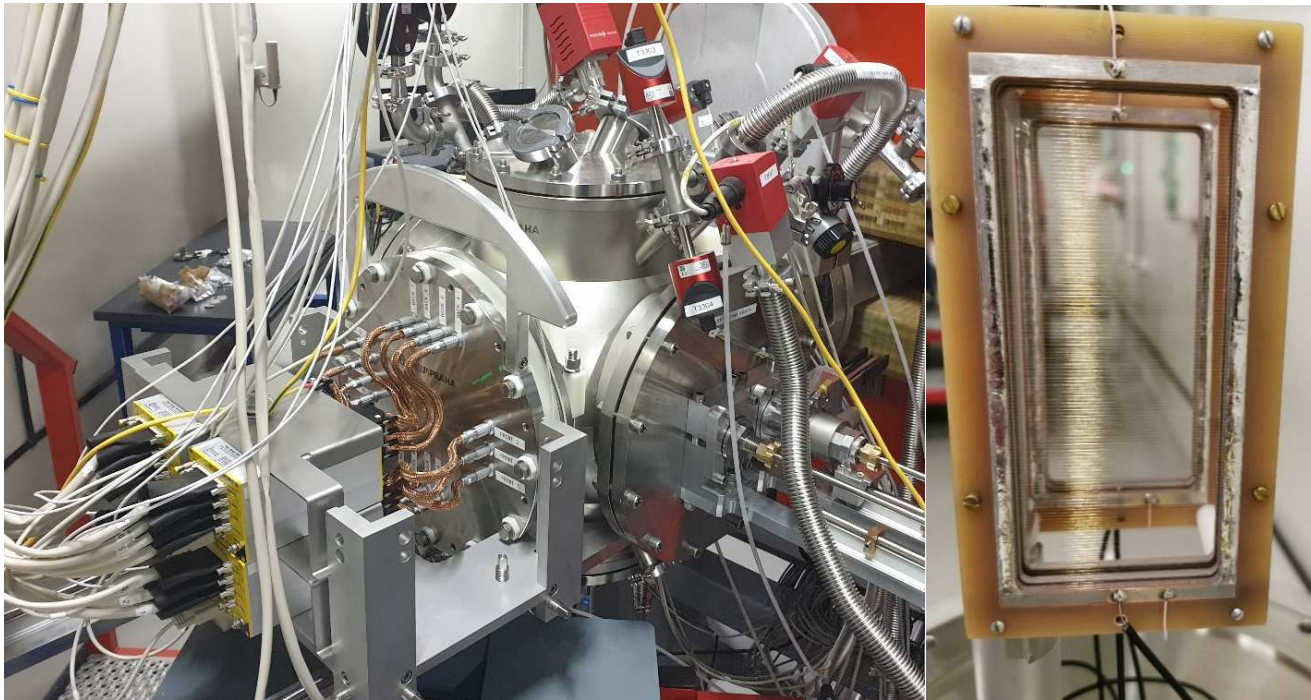


Obrázek 12: Otevřená detekční komora spektrometru DGFRS-II

¹⁸ Micron model BB17 obsahující 48 předních a 128 zadních aktivních proužků. Aktivní plocha detektoru je 47.97 mm × 127.97 mm.

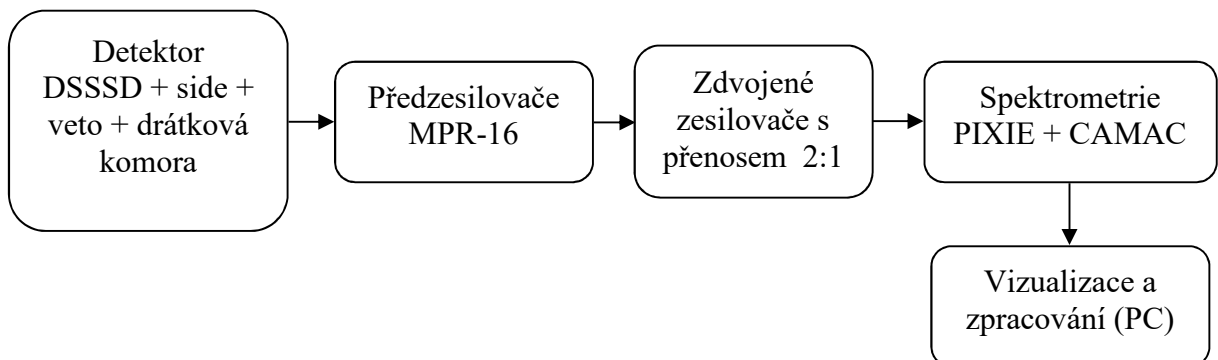
Dále obrázek 13.1 (vlevo) zobrazuje sestavenou plynotěsnou detekční komoru DGFRS-II rozšířenou o PID regulaci průtoku plynu pro správnou funkci proporcionální drátkové komory. V levém spodním rohu můžeme vidět předzesilovače MESYTEC MPR-16 v konfiguraci výstupů 7 mV/MeV/kanál.

Obrázek 13.1 (vpravo) představuje realizaci drátkové komory dávající signál dE1 a dE2.



Obrázek 13.1 Detekční komora DGFRS-II včetně předzesilovačů, PID regulace plynu i proporcionální drátkové komory.

Pro zjednodušení představy zapojení detektorové komory DGFRS-II je uvedeno blokové schéma klíčových prvků na obrázku 13.2.

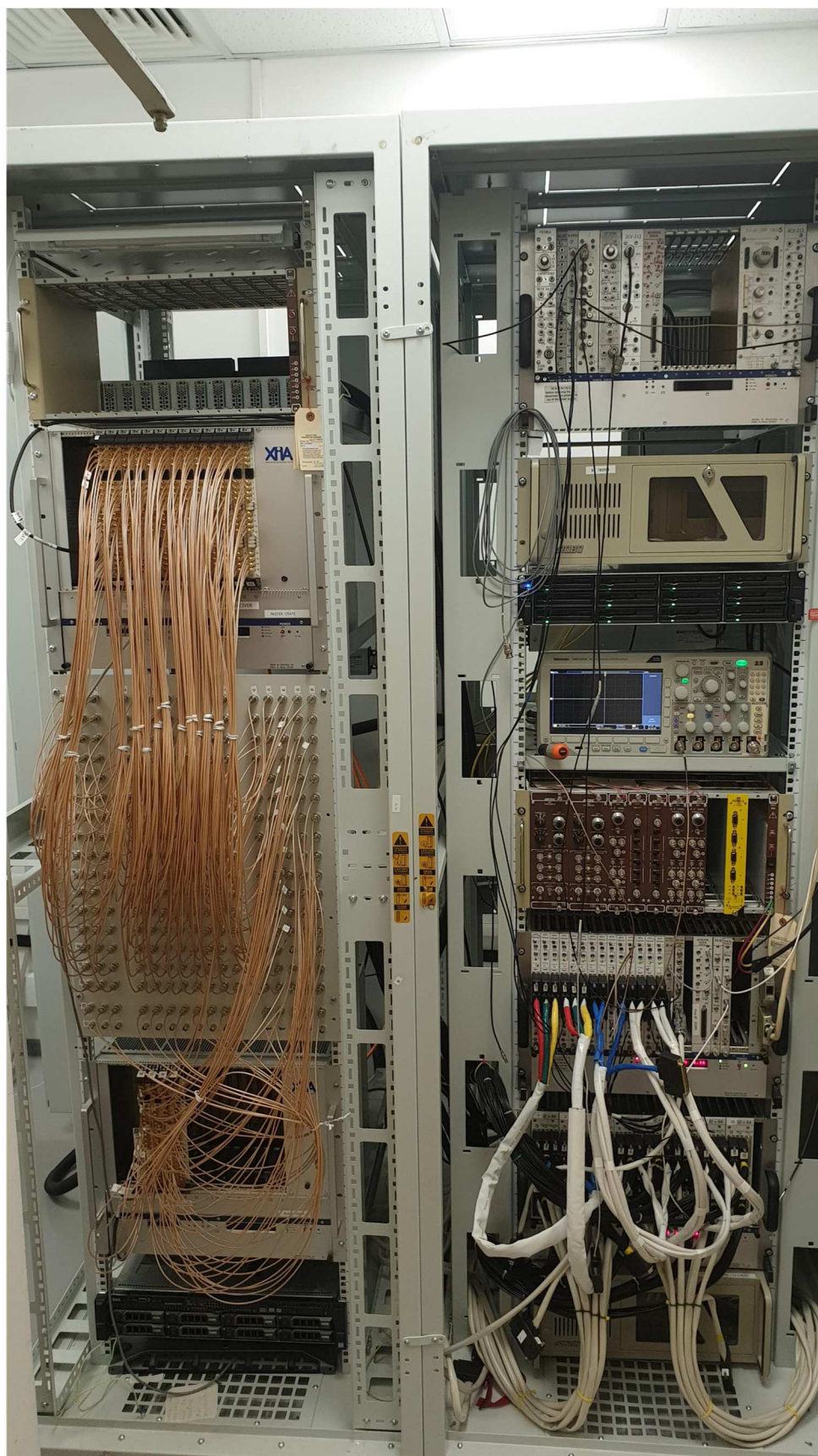


Obrázek 13.2 Blokové schéma spektrometrického podsystemu.

Systém spektrometrie na bázi digitizérů v průmyslovém standardu PXI, který měl autor této práce na starosti fyzicky sestavit, nakonfigurovat a optimalizovat parametry sběru dat, viz obrázek 14 levý stojan.

Vyvinutý spektrometrický podsystém pracuje při dané konfiguraci s detekcí až 1000 událostí na kanál při rozlišení 30 keV na každý spektrometrický kanál na škále 800 keV až 250 MeV. Celkem je zde 242 spektrometrických signálů. Plus jsou zde dva signály z drátkové komory. Spektrometrie je postavená na ověřených digitizérech na standardu PXI, dříve používaných na DGFRS-I. Zde se jednalo o 13 ks XIA PIXIE-16 100 MSaS/12 bit v jedné PXI skříni. V modernizovaném systému na DGFRS-II jsme se rozhodli zvýšit rozlišení 4× užitím digitizérů XIA PIXIE-16 100 MSaS/14bit. Pro obsluhu detekční komory o 242 kanálech bylo třeba zakoupit a nakonfigurovat 17 ks XIA PIXIE-16 100 MSaS/14bit 16ti kanálových digitizérů ve dvou časově synchronizovaných skříních standardu PXI. Tyto mnohokanálové analyzátory umožňují na úrovni hardware zapnout funkci záznamu časového průběhu signálu na každém žádaném kanále. Je tedy možné zapisovat například ze všech předních proužků DSSD (Micron model [BB17](#)) i časový průběh signálu pro pozdější ruční inspekci potenciálně zajímavých událostí, zatímco na zadních proužcích nás zajímá primárně pozice a energie.

Tím, že proužky jsou v detektoru na sebe kolmé, dostáváme tak protínající se síť a můžeme si posléze vytvořit kartézský systém souřadnic, kam částice přiletěla, kdy a s jakou energií a lze dělat korelace přiletu mezi proporcionální drátkovou komorou aj.



Obrázek 14: První implementace plné funkcionality spektrometrie DGFRS-II.

Na obrázku 14 vpravo je systém ve standardu CAMAC postavený na digitizérech ADP-16 firmy Tekhinvest. Tento úsek je zodpovědný za metodu aktivních korelací a tudíž v on-line režimu řídí blokaci urychlených ionů z urychlovače DC-280. Níže se nachází dvojné zesilovače spektrometrických signálů (obrázek 14 pravý stojan první skříň zespodu) pro identickou distribuci každého spektrometrického kanálu do obou elektronik. Tyto aktivní dvojné zesilovače s přenosem 2 jsou vlastní výroby, které pod vedení A. Voinova byly navrženy a vyrobeny na našem pracovišti. Autor této práce je pomáhal testovat a posléze byla spolu s týmem oživena celá spektrometrie.

Výhoda tohoto „duálního“ zapojení je vzájemná kontrola naměřených dat: Tudíž zvýšení redundance, různé osoby provozující analýzu dat, jiné algoritmy i HW implementace¹⁹. Navíc elektronika na bázi CAMAC v současné době vydává signál blokující urychlené iony z urychlovače DC-280 v případě, že je metodou aktivních korelací zjištěna přítomnost kandidáta na supertěžký prvek, viz spoluautorská publikace²⁰ (příloha A). Blokování svazku je zpracováno přes systém havarijního vypnutí (kapitola 6) a dále předáno na elektrostatický deflektor na stupni injekce urychlovače DC-280.

Spektrometrii na DGFRS-I a DGFRS-II jsou dále věnovány spoluautorské publikace [\[9\]](#), [\[10\]](#), [\[11\]](#), [\[12\]](#) a návazné články, viz reference daných publikací.

¹⁹ Jiný úhel pohledu na realizaci spektrometrického řetězce DGFRS-II nabízí spoluautorská publikace příloha E.

²⁰ Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., **Schlattauer, L.**, & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045.
<https://doi.org/10.1134/S1063779618060035>

5. Monitorovací a řídicí systém DGFRS-II

Jednotný řídicí a kontrolní systém technologických parametrů DGFRS-II je navržen jako víceúrovňový systém na bázi NI LabVIEW. Tím je díky své architektuře vždy schopen zajistit automatizované uvedení do bezpečného stavu v případě poruch na elektrické síti nebo na straně klienta či serveru. Pro klíčové systémy jako jsou systémy uzavírání pneumatických ventilů nebo bezpečnostních sekcí bylo zvoleno redundantní řízení stavovou logikou za pomoci relé. Takový systém pracuje nezávisle na výpadku počítačové sítě nebo jakékoliv poruchy ze strany PC a zajišťuje uvedení separátoru do konzistentního bezpečného stavu.

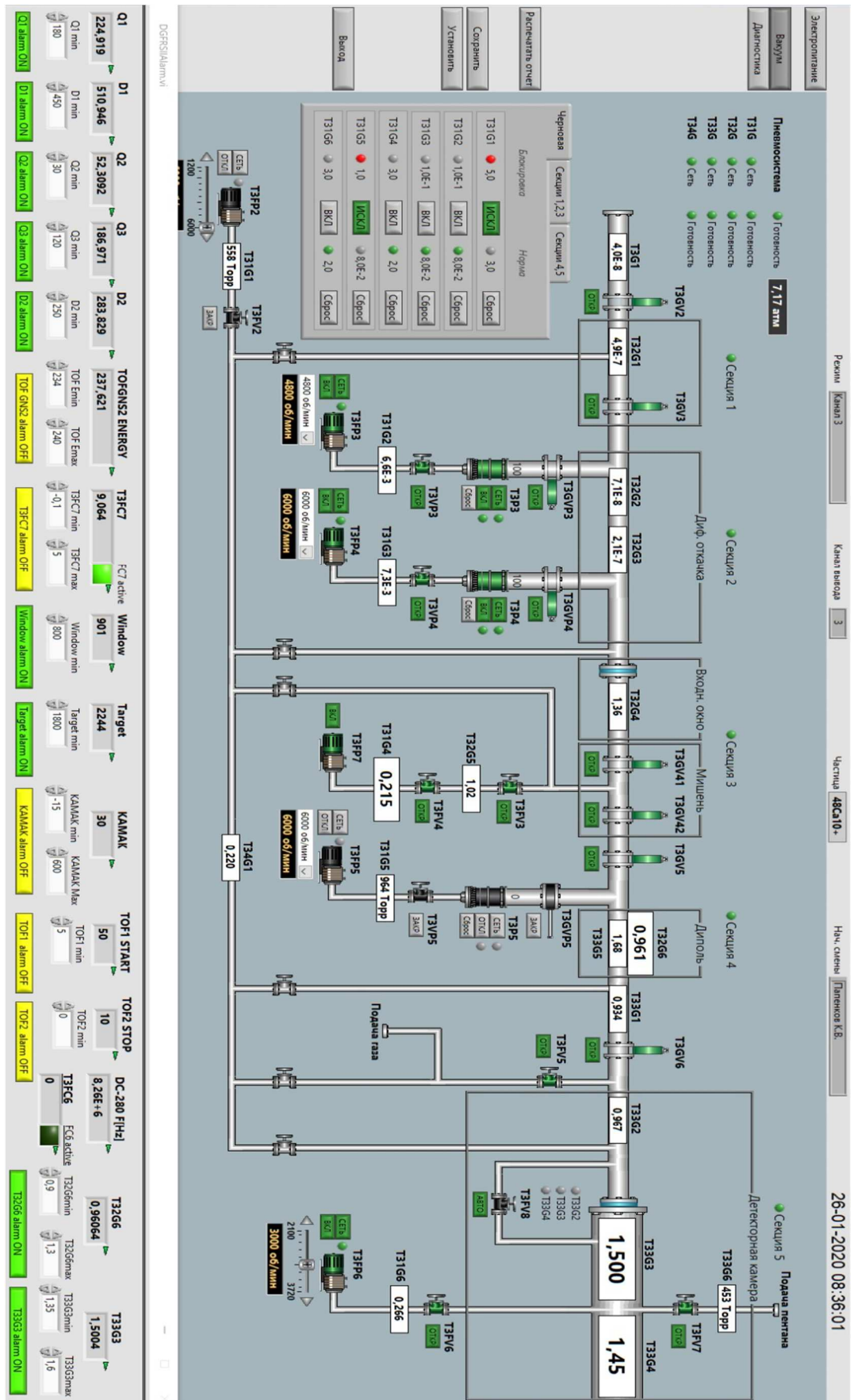
Pult operátora řídicího všechny technologické parametry separátoru DGFRS-II během experimentu vyjma PID regulace průtoku vodíku v hlavním objemu separátoru zobrazuje obrázek 15 a obrázek 16.

Obrázek 15 představuje pult řízení vakua a bezpečnostních sekcí DGFRS-II a byl vyvinut ve spolupráci se skupinou automatizace FLNR pod vedením Pashchenko S.V. Systém pro poplachy a elektronický deník vyvinutý autorem práce je ve spodní části obrázku.

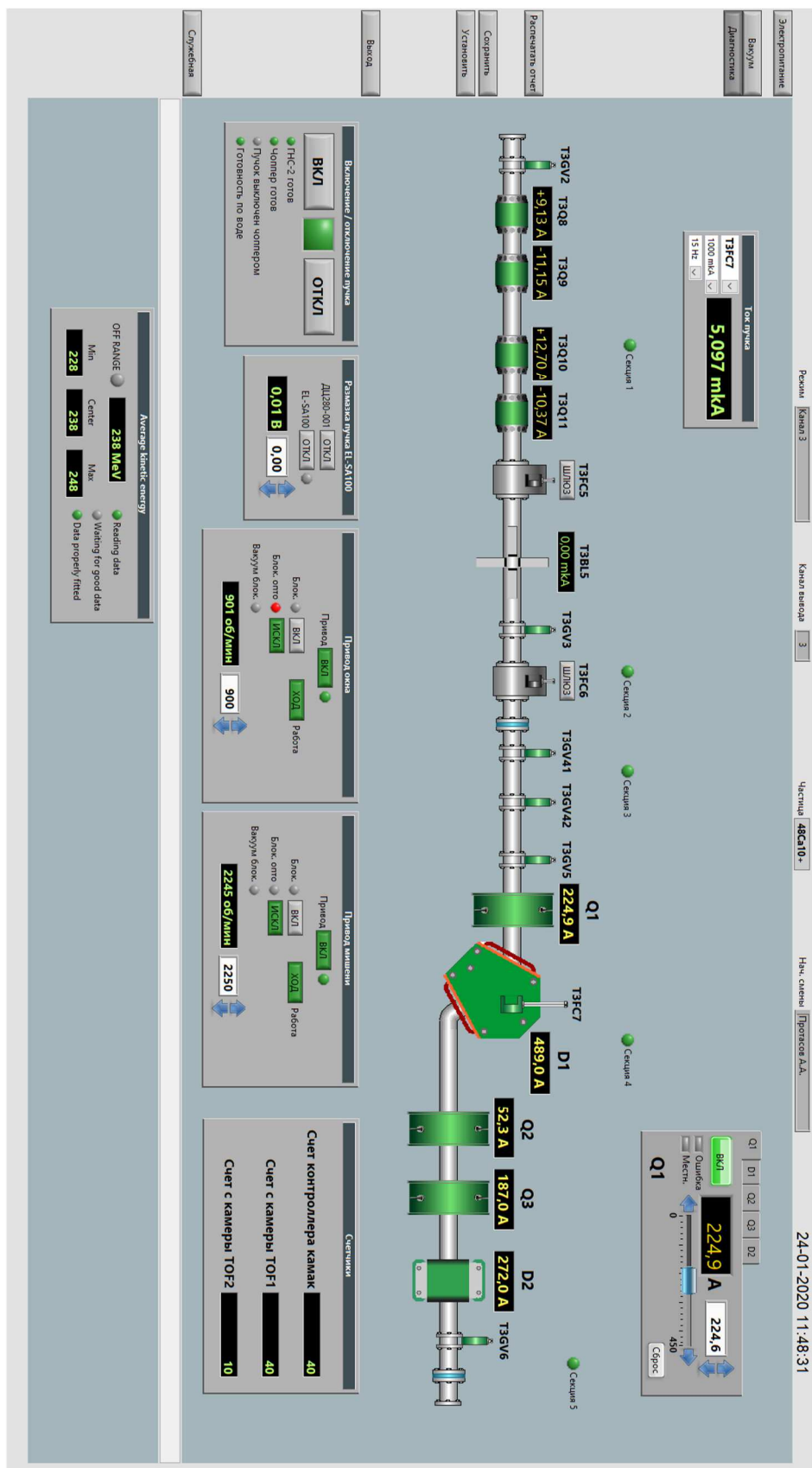
Obrázek 16 představuje pult řízení technologických parametrů a experimentu na stanovišti DGFRS-II. Realizováno skupinou automatizace FLNR pod vedením Pashchenko S.V. V levé spodní části je možné vidět klienta měření energie svazku cyklotronu a řízení experimentu pomocí bloku havarijního vypnutí, viz Kapitola 6. Obojí navrženo autorem této práce.

Oba pulty z obrázků 15 i 16 představují klienty serveru DGFRS_Host, který distribuuje všechny proměnné mezi operátorem experimentu, jednotlivými technologiemi, místnostmi, operátorem urychlovače DC-280, webovým klientem určeným pro dohled, nikoliv řízení, ze sítě internet.

Projektová dokumentace systému řízení technologií DGFRS-II je interním dokumentem laboratoře, která čítá okolo 1400 stran vytvořená na míru skupinou automatizace FLNR pod vedením Pashchenko S.V. Se skupinou automatizace autor práce po dobu vývoje a ožívání úzce spolupracoval. Se souhlasem jsou uvedeny nutné části pro základní pochopení problematiky, např. nutné pro kapitolu 6. Systém havarijního vypnutí navržený autorem.

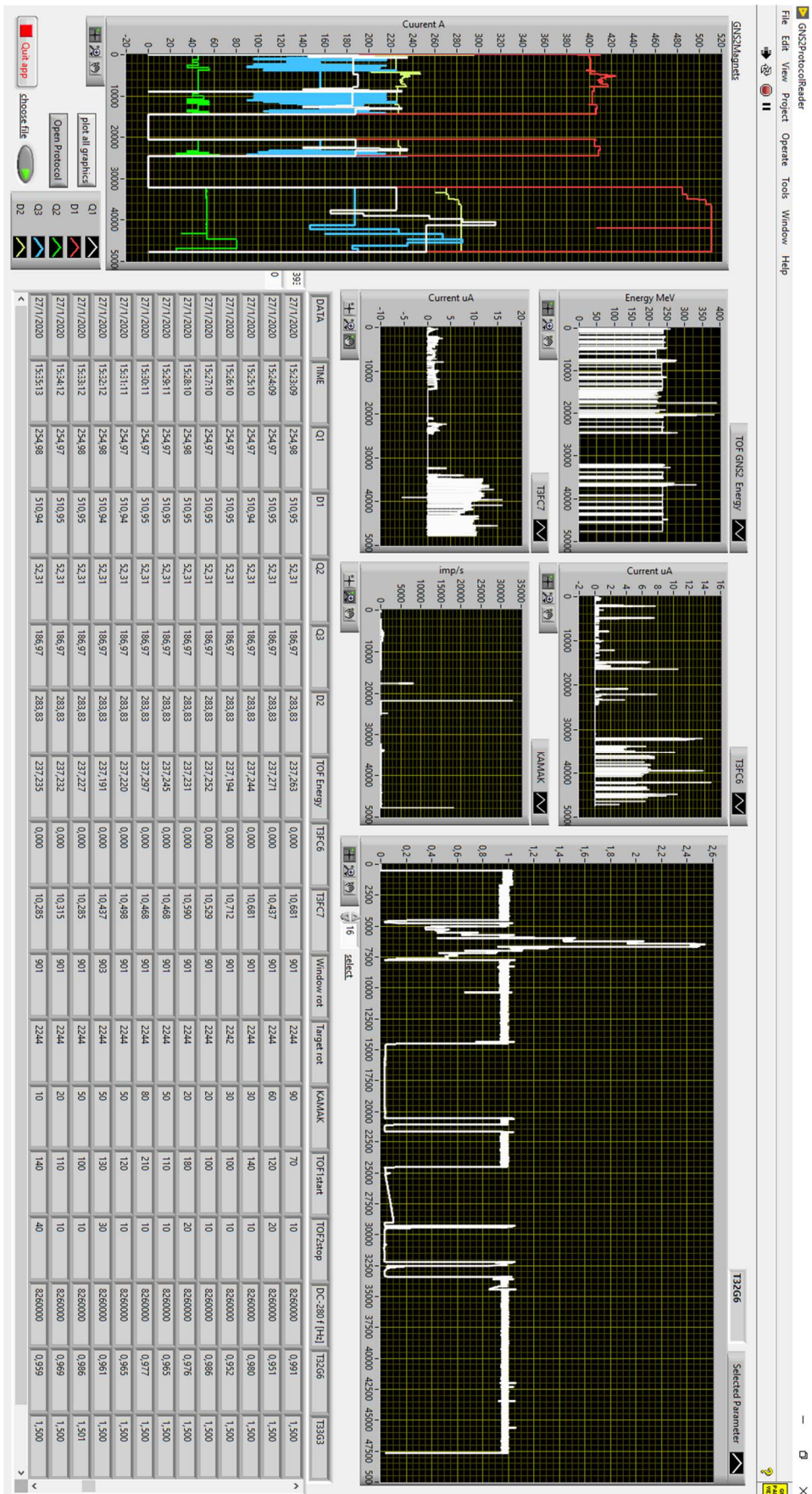


Obrázek 15 Pult řízení vakua a bezpečnostních sekčí. Systém pro poplarchy a elektronický deník vyvinutý autorem práce je ve spodní části obrázku.



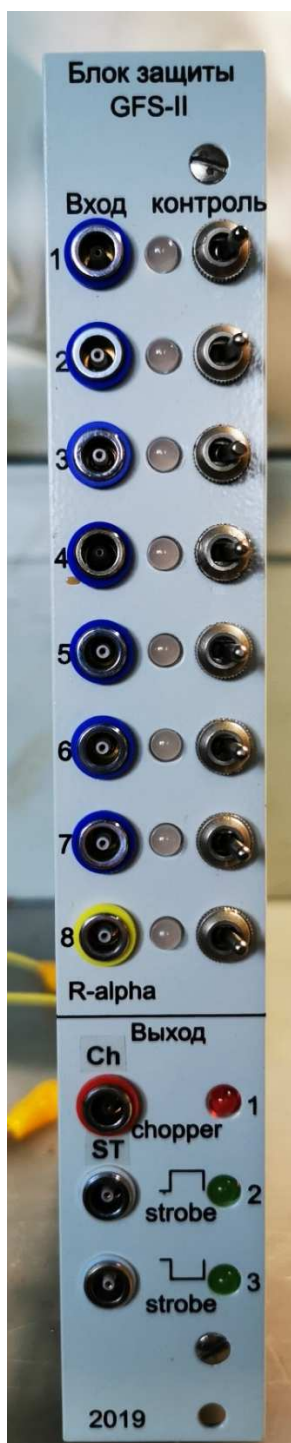
Obrázek 16 Pult řízení technologických parametrů a experimentu. V levé spodní části je možné vidět klienta měření energie svazku cyklotronu a řízení experimentu pomocí bloku havarijního vypnutí, viz Kapitola 6. Obojí navrženo autorem této práce.

Ze všech 17 klíčových parametrů separátoru DGFRS-II se píše každou minutu (nebo jiný zvolený interval) elektronický deník ve formátu ASCII navržený autorem práce. Součástí bylo dodání i jednoduché aplikace, která umožňuje číst daný formát a vizualizovat historická data separátoru. První verzi takové aplikace zachycuje obrázek 17. Aplikace umí načíst ze serveru automaticky aktuální pracovní sadu dat a vizualizovat je. Lze zde přepínat ve velkém grafu zvolený parametr a zobrazit jej. Zároveň jsou některé hlavní parametry vždy fixně zobrazeny. Aplikace je vhodná pro získání přehledu, například co se stalo za poslední 3 hodiny, v minulé směně apod. Pro vyhodnocení dat z experimentu se potom používají data z přehledně strukturovaného ASCII textového souboru.



Obrázek 17 Vizualizace deníku parametrů DGFRS-II navrženo autorem práce.

6. Systém havarijního vypnutí DGFRS-II



Obrázek 18. Navržený blok Ochrany DGFRS-II

Vyvinutý modul ochrany DGFRS-II zajišťuje sdružení signálů poruch separátoru na úrovni HW prvků bez SW či FW. Jedná se o syntetizovanou TTL logiku na bázi Intel CPLD, kde na vnitřních spojích daných logických celků jsou buňky EEPROM. Modul funguje nezávisle v momentě přítomnosti napájení a sdružuje sedm různých poruch separátoru na matici OR a dává příkaz elektrostatickému deflektoru na stupni injekce ionů do cyklotronu DC-280.

Poruchy jsou zejména neočekávané (číslováno podle vstupů):

- 1) Poklesy proudu na hlavním separačním dipólu (modul komparátorů), hlavní měřicí větve.
- 2) Poklesy proudu na hlavním separačním dipólu, záložní měřicí větve.
- 3) Poklesy otáček radioaktivního terče, hlavní měřicí větve (modul komparátorů).
- 4) Poklesy otáček radioaktivního terče, záložní měřicí větve. Optozávora na disku terče (modul otáčení).
- 5) Poklesy otáček vstupního okna, hlavní měřicí větve (modul komparátorů).
- 6) Poklesy otáček vstupního okna, záložní měřicí větve (modul otáčení).
- 7) Poklesy proudu deflektoru svazku, „rozmasky“ (modul komparátorů).

Vzniklými poruchami se do několika ms přerušuje tok svazku z urychlovače DC-280 na separátor DGFRS-II.

Osmý vstup je vyhrazen pro odstávku svazku na základě metody aktivních korelací z CAMAC spektrometru pro zajištění měření rozpadových řad bez pozadí ze svazku z cyklotronu. Tento osmý vstup je připojen na výstupy STROBE přes detektor sestupné hrany s přetvarováním na 100 ms. Takový signál poté zajišťuje obnovení svazku po ukončení měření rozpadových řad.

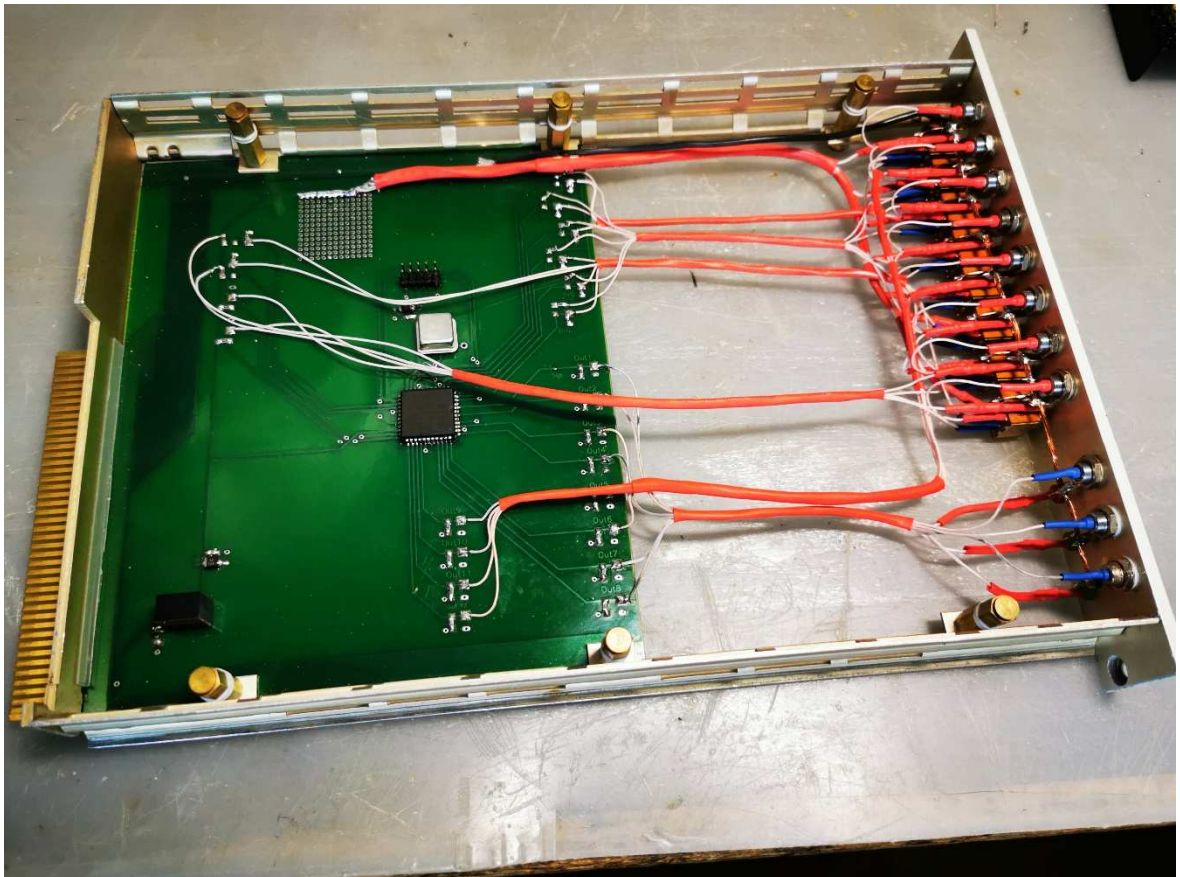
V opačném případě bez příchodu STROBE si stavová logika pamatuje poruchu a vše je zastaveno do příchodu operátora, který musí přijmout řešení na základě stavu operátorských panelů vizualizace parametrů DGFRS-II.

Vývoj a realizaci modulu i systému havarijního vypnutí zachycují obrázky 18 až 25.

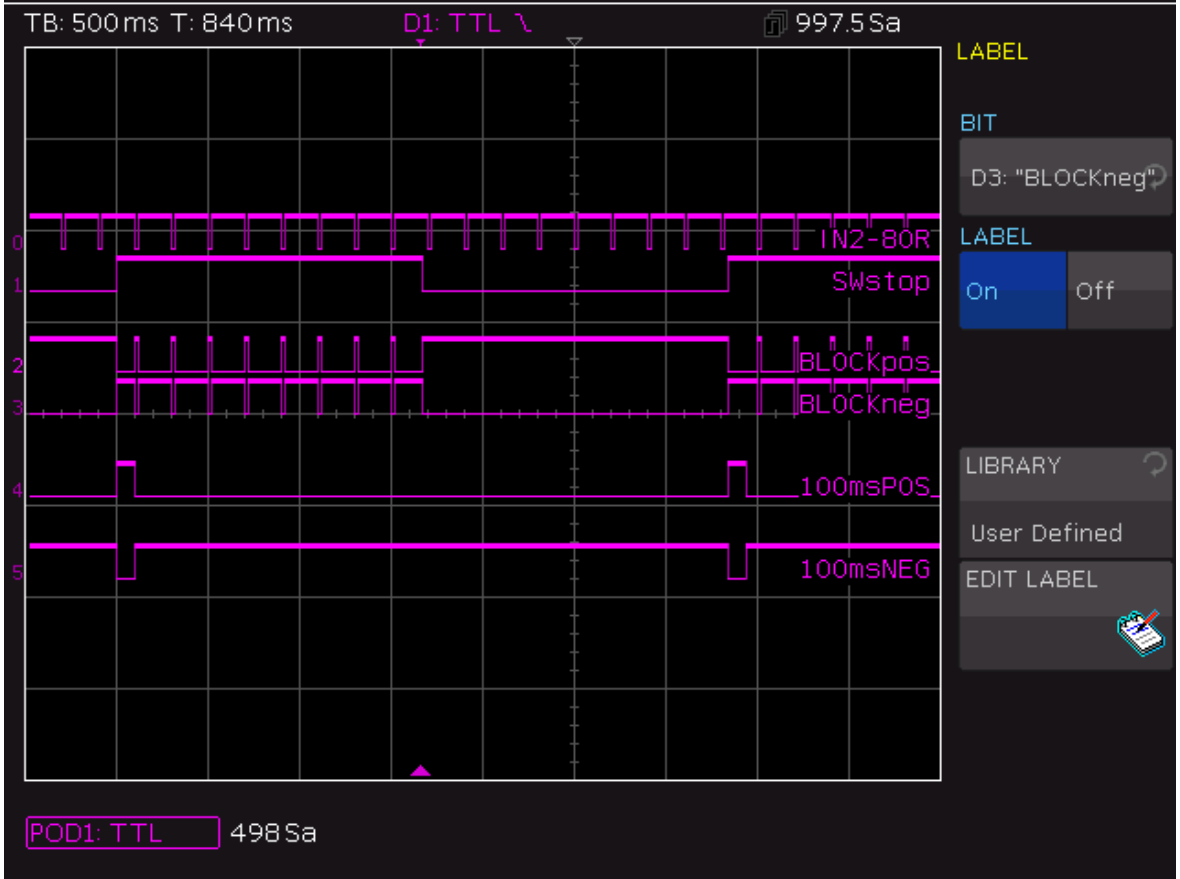
Konstrukce: Voinov. A.A., Kuznetsov D.A., obrázek 18 až 20.

Návrh a systémová integrace: Schlattauer L. Obrázek 21 a 22.

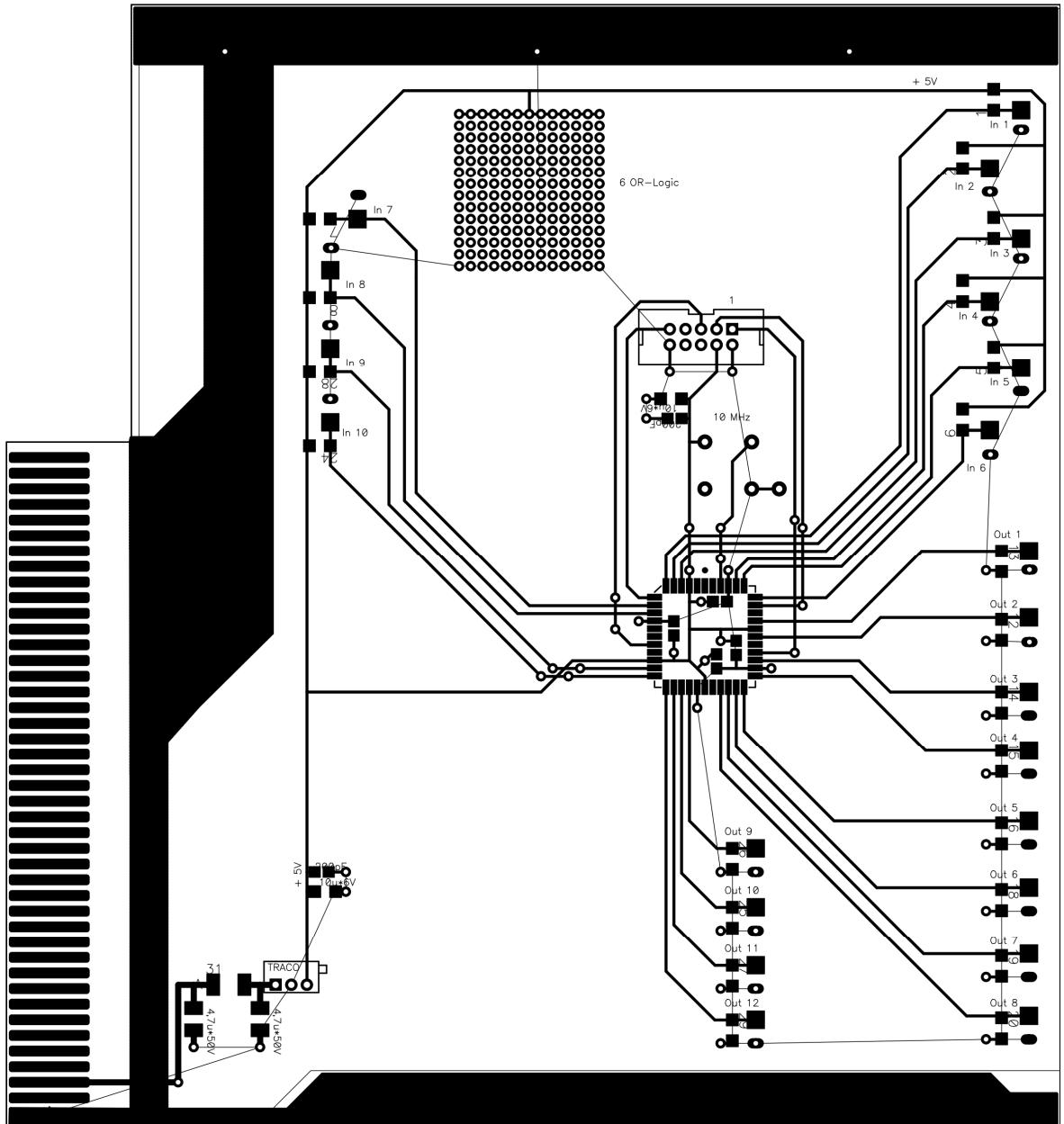
Uvedení do provozu společně s Polyakov A. N. Obrázek 23 až 25.



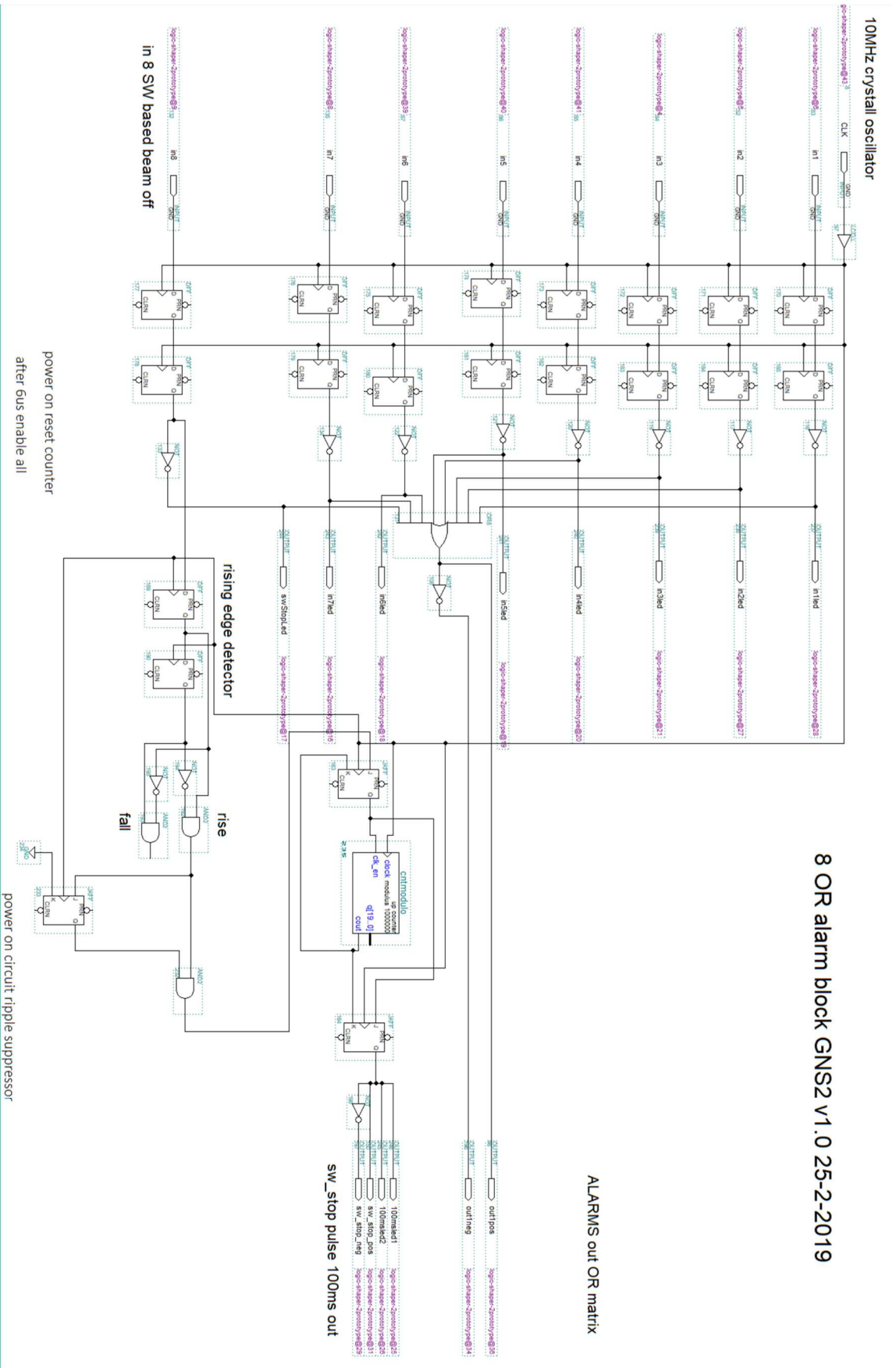
HMO3054 (HW 0x10111000; SW 06.005) 2019-02-25 16:01
 HMO3004-KAB506 Norm-Trig./Complete **ROHDE & SCHWARZ**



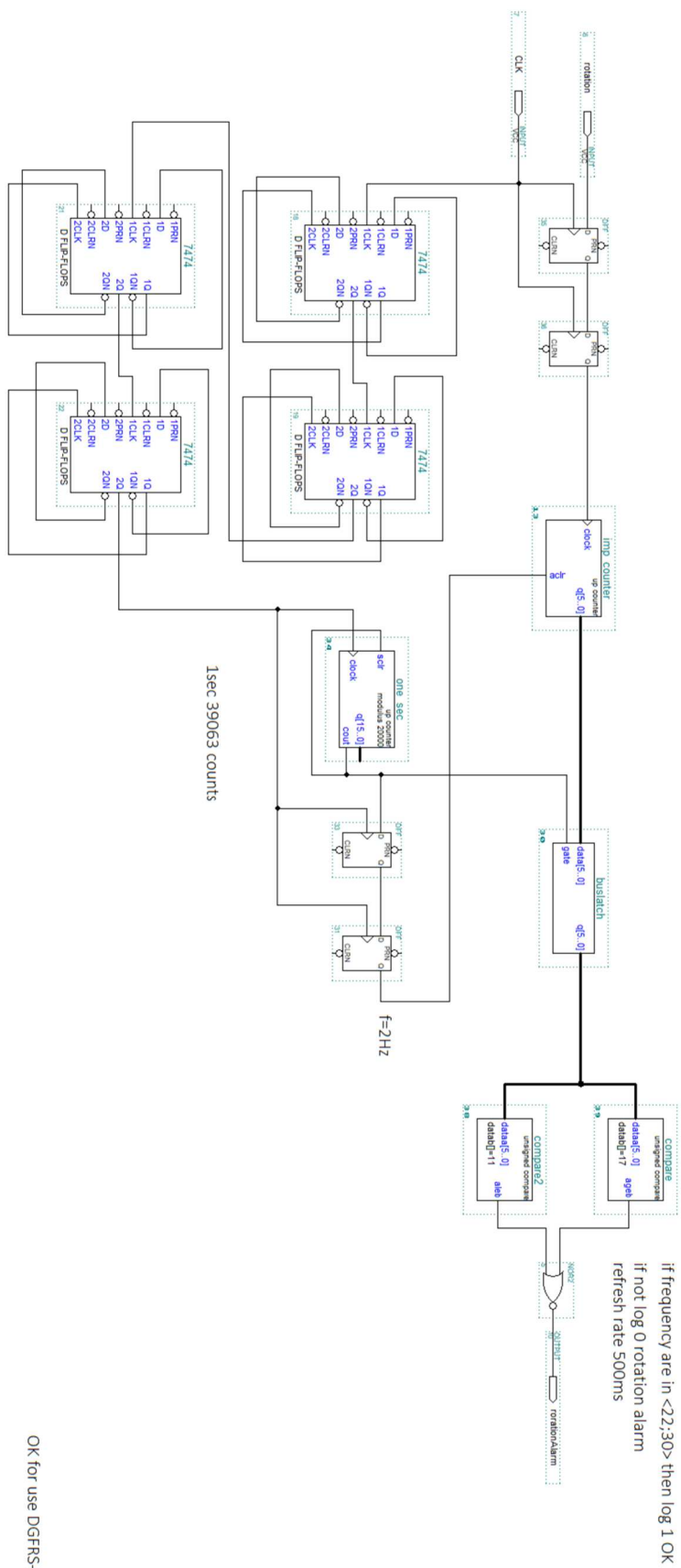
Obrázek 19. Blok ochrany realizace (nahore), elektrický test (dole).



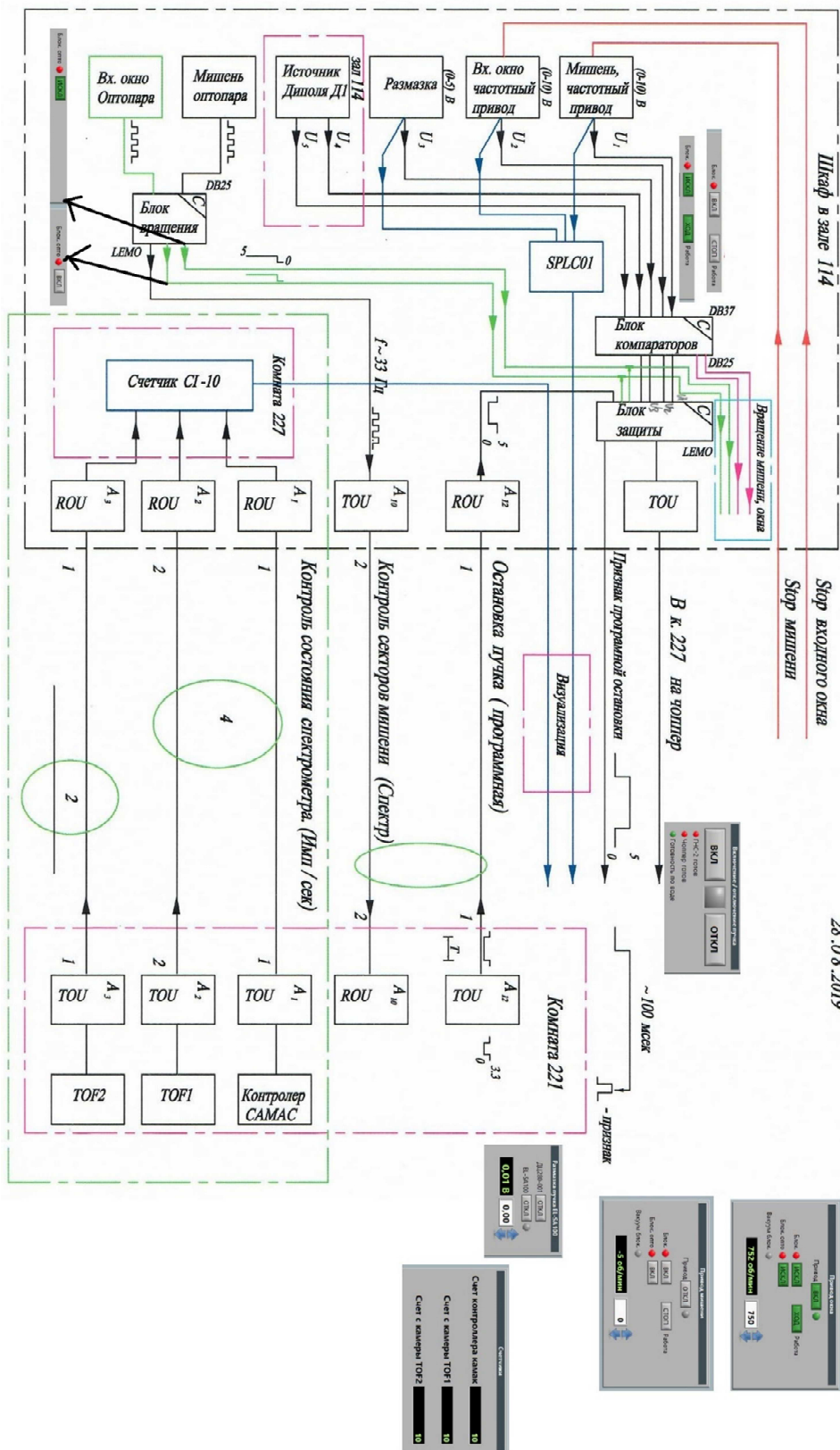
Obrázek 20. Blok ochrany návrh desky plošných spojů.



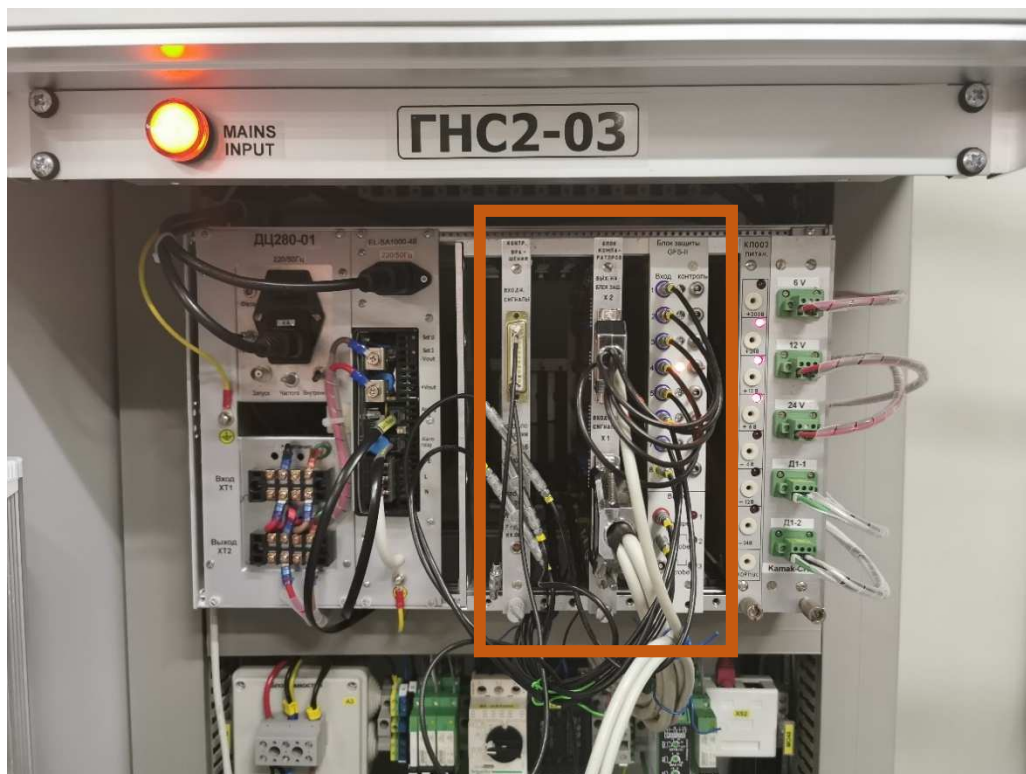
Obrázek 21 Principiální schéma bloku ochrany DGFRS-II.



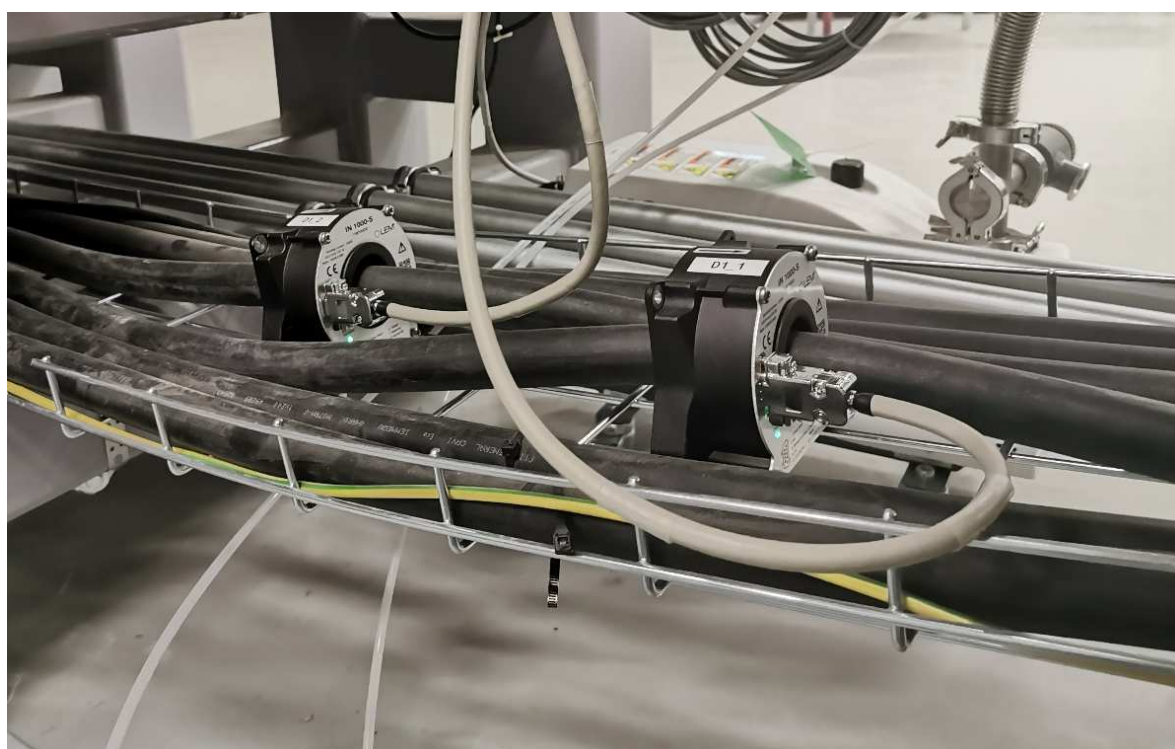
Obrázek 22 Principální schema kontroly otáčení radioaktivního terče.
Vstup optočlen výstup stavová TTL negativní logika.



Obrázek 23 Blokové schéma subsystému havarijního vypnutí svazku ускоренých ионů z cyklotronu DC-280.



Obrázek 24 Realizace havarijního vypnutí



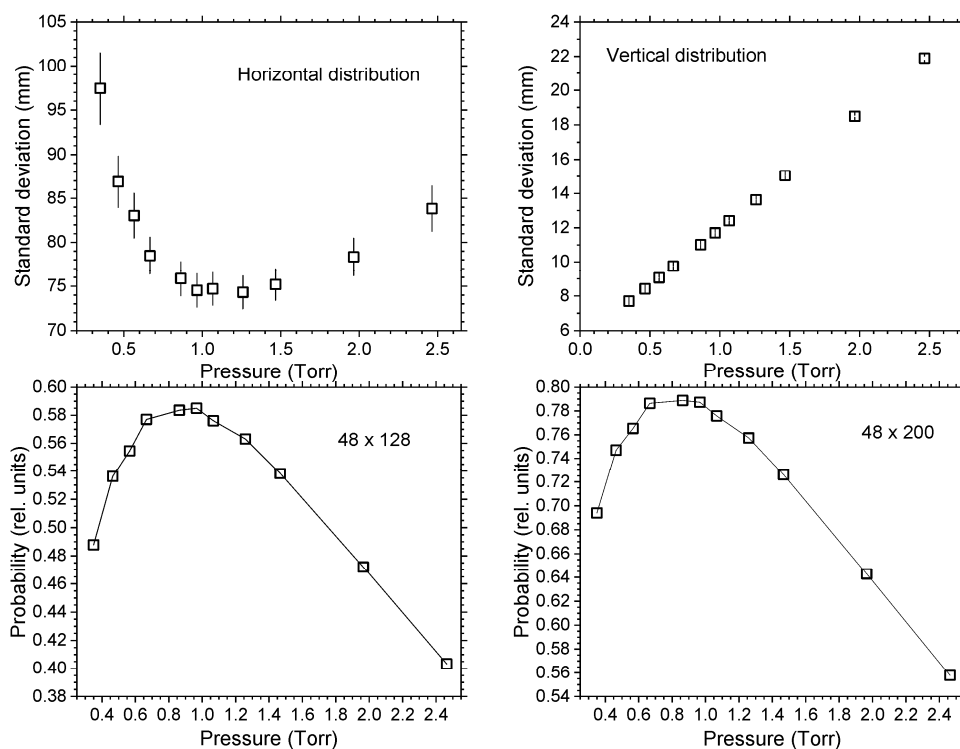
Obrázek 25 Měření proudu hlavního dipólu v rozsahu 0A až 1000A na bázi linearizovaného hallova snímače LEM IN 1000-S. Přesnost měření 0.0018 % z plné škály.

7. DGFRS-II první testy, výsledky srovnání charakteristiky

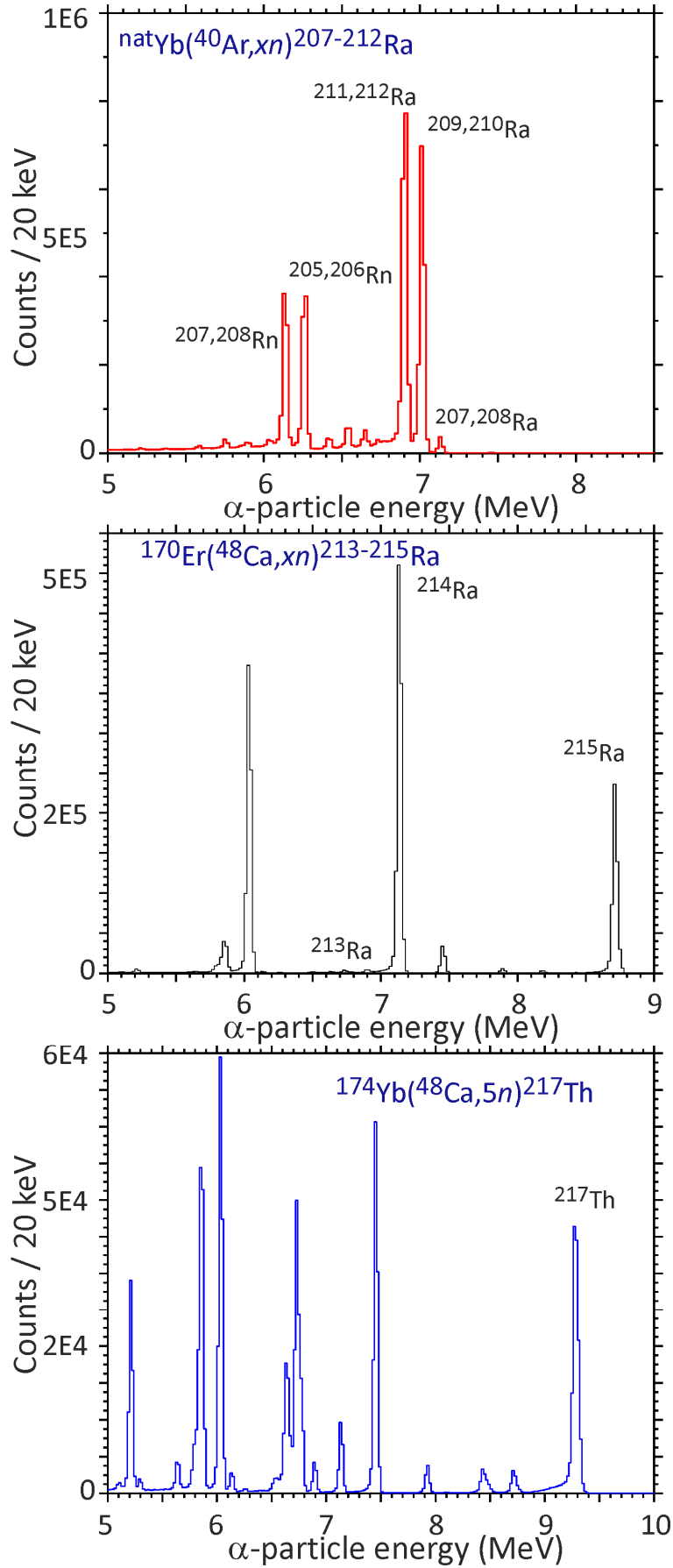
První testy separátoru a nastavení všech elementů probíhalo na reakcích $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{170}\text{Er}$, $^{48}\text{Ca}+\text{Pb}$ pro různé tlaky vodíku i hélia. Veškeré technické prostředky, přístroje a zařízení obstála při 24/7 testech trvajících mezi 8/2019 až 5/2020. Klíčové k datu tisku práce nepublikované výsledky parametrů nového separátoru DGFRS-II uvádím s dovolením autora Utyonkov V.K. v obrázku 26 a 27.

Obrázek 26 vypovídá o nejvyšší účinnosti separátoru DGFRS-II při tlaku provozního plynu vodíku okolo 1 Torr (133 Pa). Toto se potvrdilo při testových reakcích $^{48}\text{Ca}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{170}\text{Er}$, $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Yb}$. Spektra takových reakcí v alfa škále jsou prezentována na obrázku 27 na další straně.

Prezentovaná data, konkrétně obrázek 26 a 27 představují dosud nepublikované výsledky kolektivní práce. Zde uvádím s ústním svolením autora Utyonkova V.K., od kterého autor této práce danou analýzu obdržel.



Obrázek 26 Závislost pravděpodobnosti průchodu produktů syntézy na tlaku v separátoru.



Obrázek 27 Výsledky spektrometrie na alfa škále pro dané reakce.

Závěr

V této práci byly prezentovány výsledky z experimentu jaderné fúzní reakce ionů ^{48}Ca s terčem ^{240}Pu na stanovišti DGFRS-I publikované v časopise Physical Review C.

Dále byl kladen důraz na představení podsystémů řízení a sběru dat starého a nového separátoru navrženého autorem:

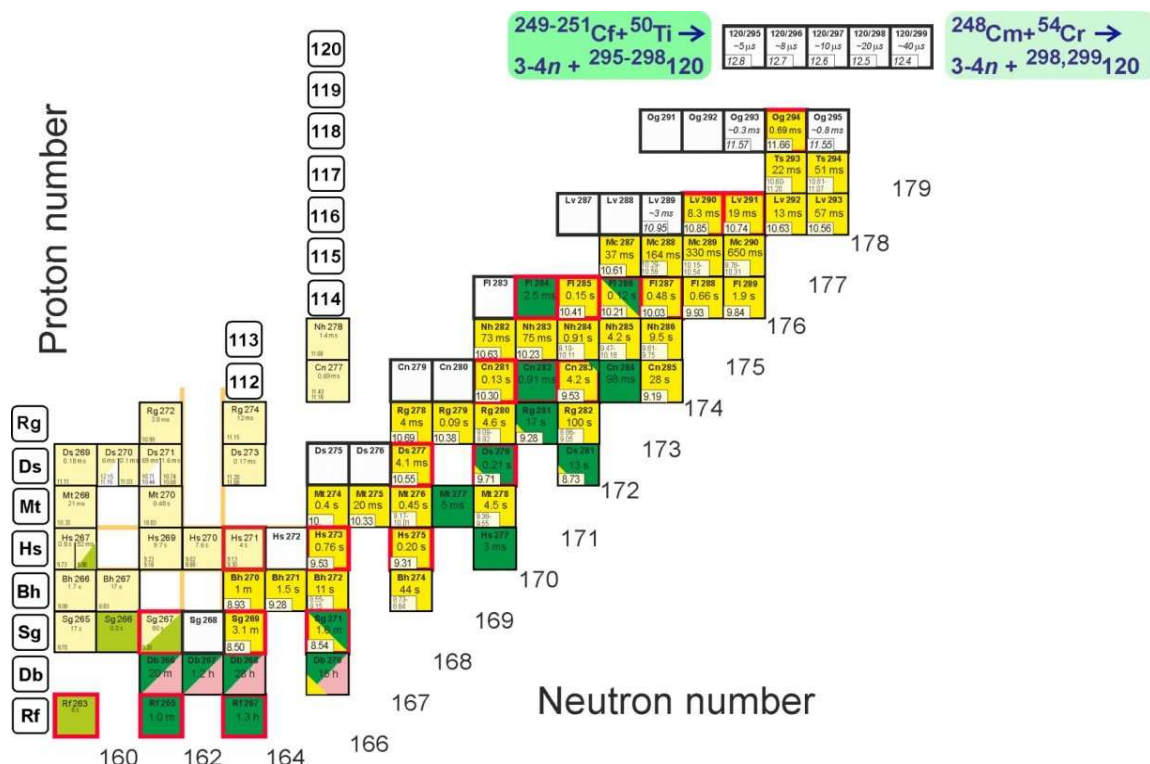
- Systém pro automatické online měření energie svazku urychlených ionů z urychlovače U-400 i DC-280 využívající metody doby průletu (TOF) byl nasazen za pomoci vyvinutého software na platformě NI LabVIEW, NI DSC, NI IVI, NI web Server.
- Navržený systém nouzového vypnutí v případě poruchy na hlavním dipólu či otáčením radioaktivního terče či okna oddělující vakuum od pracovního plynu byl nasazen do experimentální haly a úspěšně prošel testy na DGFRS-II.
- Systém dohledu vybraných kritických parametrů separátoru byl naprojektován a nasazen na míru v NI LabVIEW. V případě, že daná veličina vyjde ze stanoveného pracovního rozsahu, ozve se hlas, který přečte předem definovaný text poruchy a daná veličina začne blikat červeně. Nasazeno v provozu na DGFRS-II.
- Byl vytvořen elektronický deník v NI LabVIEW, který zapisuje automaticky v nastavených časových intervalech klíčové technologické parametry experimentu. Nasazeno do provozu na DGFRS-II.
- Autorem práce byl sestaven a uveden do provozu systém spektrometrie na bázi digitizérů PXI s rozlišením 30 keV při škále 800 keV až 250 MeV při počtu 242 nezávislých spektrometrických kanálů.
- Autorské a spoluautorské publikace jsou uvedeny plným textem v kapitole 1.1. a v přílohách A až F.

- Autorem spoluvyvíjený hardware a software během stáže v SÚJV je dále prezentován formou příloh 1 až 15.

Lze konstatovat, že první testy separátoru a nastavení všech elementů probíhalo na reakcích $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{170}\text{Er}$, $^{48}\text{Ca}+\text{Pb}$ pro různé tlaky vodíku i hélia. Veškeré technické prostředky, přístroje a zařízení obstála při 24/7 testech trvajících mezi 8/2019 až 5/2020.

Diskuze

Na základě výsledků těchto testů se ve fázi úprav nachází detekční systém – zvětšení plochy pro zajištění dopadu všech produktů na detektorovou plochu vzhledem k disperzi na hlavním magnetu a nemožnost jakýmkoliv prostředky zaostřit výsledné produkty do plochy detektoru na ose X. Aktivní plocha detektoru Micron BB17 je v současné době (47,97mm x 127,97mm). Tyto výsledky jsou prozatím interními daty k datu tisku práce. Modifikace čítá zvětšit komoru na (95,94mm x 255.94mm) aktivní plochy. To znamená přidat 140 spektrometrických kanálů do spektrometrie. Úprava konstrukce detektorové komory. Výměna vstupního okna za diferenciální vakuovou soustavu snižující vysoké vakuum urychlovače, které se pohybuje v řádu 10^{-8} Torr na nízké vakuum 10^{-3} Torr pro reakci přímo s terčem. Vstupní okna z Ti folie se ukázala jako nejslabší článek řetězce pro jejich časté propálení svazkem²¹, kterému se nedalo nijak zabránit přes veškeré kombinace nastavení experimentálních parametrů. Na obrázku 28 je názorně zobrazený plán budoucích experimentů po modifikaci, které se předpokládají v roce 2021.



Obrázek 28 Plánovaný budoucí experiment po dokončení všech modifikací. Předpokládá se syntéza nového prvku $Z=120$ při reakci $^{249-251}\text{Cf} + ^{50}\text{Ti}$. Obrázek získán s dovolením autora Utyonkova V.K.

²¹ Doba funkce vstupního okna byla v intervalu (2 až 60) hodin, než došlo k porušení jeho integrity.

Použité zdroje

- [1] Yu.Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, Super-heavy element research, Rep. Prog. Phys. **78**, 036301 (2015).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/78/3/036301/pdf>
- [2] Yu.Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions, Nucl. Phys. A **944**, 62 (2015).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947415001517>
- [3] V.I. Zagrebaev, A.V. Karpov, and Walter Greiner, Possibilities for synthesis of new isotopes of superheavy elements in fusion reactions, Phys. Rev. C **85**, 014608 (2012).
<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.85.014608>
- [4] Hofmann, S., Heinz, S., Mann, R. et al. Review of even element super-heavy nuclei and search for element 120. Eur. Phys. J. A **52**, 180 (2016).
<https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16180-4>
- [5] K. Subotic, Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, Yu.V. Lobanov, F.Sh. Abdullin, A.N. Polyakov, Yu.S. Tsyganov, O.V. Ivanov, Evaporation Residue Collection Efficiencies and Position Spectra of the Dubna Gas-filled Recoil Separator, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **481**, 71 (2002).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201013675>
- [6] V.K. Utyonkov, N.T. Brewer, Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Sabel'nikov, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer, and S.Y. Strauss. Experiments on the synthesis of superheavy nuclei ^{284}Fl and ^{285}Fl in the $^{239,240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$ reactions. Physical Review C **92**, 034609 (2015).
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1493143>
- [7] Schlattauer, L., Parali, L., Pechousek, J., Sabikoglu, I., Celiktas, C., Tektas, G., Prochazka, V. (2017). Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW-based digital system. *European Journal of Physics*, **38**(5).
<https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa7a7a> (příloha F)

- [8] Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., **Schlattauer, L.**, & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045. <https://doi.org/10.1134/S1063779618060035> (příloha A)
- [9] Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Voinov, A. A., Zubarev, A. N., & **Schlattauer, L.** (2016). New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1134/S1547477116050435> (příloha B)
- [10] Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., **Schlattauer, L.**, & Voinov, A. A. (2017). Development of the autocalibration system for the DGFRS spectrometer based on the double-sided silicon strip detectors. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/335-339-paper-54.pdf> (příloha E)
- [11] Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Voinov, A. A., **Schlattauer, L.**, Shumeiko, M. V., & Barinova, S. V. (2017). An upgraded e-tof- ΔE based spectrometer of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/309-317-paper-50.pdf> (příloha D)
- [12] **Schlattauer, L.**, Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Tsyganov, Y. S., & Voinov, A. A. (2017). New particle position determination modules for double sided silicon strip detector at DGFRS. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/265-270-paper-42.pdf> (příloha C)
- [13] Sukhov, A.M., Polyakov, A.N. & Tsyganov, Y.S. Parameter monitoring and control system of Dubna Gas-Filled Recoil Separator. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 7, 370–377 (2010). <https://doi.org/10.1134/S1547477110050122>

Návazné zdroje jsou vedeny v dílčích publikacích autora viz příloha A až F a proto zde nejsou uvedeny (dalších 123 zdrojů).

Seznam příloh

Příloha A Spoluautorská publikace Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect	65
Příloha B Spoluautorská publikace New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements	75
Příloha C Spoluautorská publikace NEW PARTICLE POSITION DETERMINATION MODULES FOR DOUBLE SIDED SILICON STRIP DETECTOR AT DGFRS	79
Příloha D Spoluautorská publikace AN UPGRADED E-TOF- ΔE_1 - ΔE_2 BASED SPECTROMETER OF THE DUBNA GAS-FILLED RECOIL SEPARATOR	85
Příloha E Spoluautorská publikace DEVELOPMENT OF THE AUTOCALIBRATION SYSTEM FOR THE DGFRS SPECTROMETER BASED ON THE DOUBLE-SIDED SILICON STRIP DETECTORS ...	94
Příloha F Autorská publikace Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW-based digital system	99
Příloha 1 Navržený modul pro spektrometr 6-ИЛИ	111
Příloha 2 Aplikace pro vzdálené řízení PID regulátoru průtoku pentanem v detektoru	115
Příloha 3 realizace osmi čítačů / intenzimetrů a 8bitového výstupního registru za pomoci NI LabVIEW, kontroléru Wiener CC USB a univerzální karty CMDGG-8.....	116
Příloha 4: Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer CenterThree a jeho vzdálenou konfiguraci.	120
Příloha 5: Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer TPG362 a jeho vzdálenou konfiguraci.....	121
Příloha 6: Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer TPG366 a jeho vzdálenou konfiguraci.....	123
Příloha 7:Realizace přípravku pro nastavení modulu komparátorů technologických parametrů DGFRS-II na úrovni HW.....	125
Příloha 8 Automatický test starých vstupních registrů sběrnice CAMAC.	126
Příloha 9 Spektrometr CAMAC na bázi NI LabVIEW a kontroleru Wiener XX USB	127
Příloha 10 Program pro vizualizaci 16 kanálových spekter s možností otevřít 16 spekter v novém okně jako paralelní procesy.	128
Příloha 11 Program pro testování modulu poruch vyvíjené A.M. Sukhovem pro DGFRS-II	130
Příloha 12 Funkce zápisu denníku měření energie svazku z TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II..	131
Příloha 13 Funkce pro volání Windows API pro čtení hlasem poruch separátoru DGFRS-II	132
Příloha 14 Prototyp nového vstupního registru sběrnice CAMAC KR-005M ve vývoji	133
Příloha 15 Diagnostická aplikace pro test pozičního detekčního systému příletu částice do DSSD	135

Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect

Yu. S. Tsyganov^{a,*}, A. N. Polyakov^a, V. I. Kazacha^a, L. Schlattauer^{a,b}, and Z. Zhang^c

^aFlerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141930 Russia

^bDepartment of Experimental Physics, Faculty of Science, Palacky University, Olomouc, 77200 Czech Republic

^cInstitute of Modern Physics, Lanzhou, Gansu, 730000 China

*e-mail: tyra@jinr.ru

Abstract—The Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR), JINR, is the most advanced facility for the synthesis and study of new superheavy nuclei. In the recent years, new elements with $Z = 114$ to 118 (Fl, Mc, Lv, Ts, Og) have been successfully synthesized. The DGFRS detection system and a unique method of active correlations for background suppression have played a significant role in these discoveries. Theoretical-methodological aspects of further development of the active correlation method are considered, especially in view of the upcoming commissioning of the new FLNR high-intensity DC-280 cyclotron for acceleration of heavy ions and the new gas-filled recoil separator. A numerical model of the edge effects between the neighboring strips on the p - n junction side of the DSSSD detector is presented. The corresponding empirical examples are given. A more flexible real-time algorithm is considered as a possible substitute for the current version with the rigidly set parameters. Since stability of the calibration parameters is strongly required for applying the method, the radiation stability factor is also briefly considered.

DOI: 10.1134/S1063779618060035

1. INTRODUCTION

According to quantum electrodynamics, the well-known concept of the atom as a system consisting of a nucleus, in which the positive charge and almost entire mass of the atom are concentrated, and electrons orbiting at a large distance from the nucleus is valid for very heavy atoms up to the atomic numbers $Z \sim 170$ and even higher. However, the existence of atoms (elements) terminates much earlier because of instability of the nucleus itself. Heavy elements with $Z > 100$ can only be obtained in reactions with heavy ions. The main advantage of these reactions is that fusion of an ion with a nucleus results in a noticeable increase in its charge. At the same time, the excited compound nucleus is characterized by high fissionability and only very rarely decays with emission of neutrons that carry away all of its excitation energy. The probability of this process for the heaviest elements is 10^{-10} and even less. Therefore, synthesis of transuranic elements requires high-intensity beams of heavy ions, highly efficient detection of rare decays, and long-time experiments. Two experimental directions can be distinguished. The first is hot fusion reactions, in which targets of uranium and other heavy elements are bombarded by relatively light ions (from C to Mg) and the compound nucleus has rather high excitation energy of up to 40 MeV.

All new isotopes of superheavy elements obtained at FLNR were synthesized in reactions of ^{48}Ca ions with actinide targets at the Dubna Gas-Filled Recoil Separator using methods, algorithms, and approaches with record characteristics in their field.

One of these radical methods is the active correlation method [1–6], which allows alpha decays of implanted superheavy nuclei to be detected almost in the absence of background [7, 8]. The essence of the method is an almost instantaneous (within $\sim 100 \mu\text{s}$) switching off the cyclotron beam upon detection of a decay consistent with the pattern “recoil nucleus–alpha decay” (ER- α) in real time.

2. EDGE EFFECTS AND A SIMPLE EQUIVALENT CIRCUIT OF NONEQUILIBRIUM CHARGE SHARING

2.1. Equivalent Circuit for the Interstrip Gap on the p - n Junction Side of the DSSSD Detector

In what follows, edge effects in the vicinity of DSSSD strips on the p - n junction side are supposed to occur due to sharing of the nonequilibrium charge generated by a charged particle in the space charge region between two neighboring strips [9]. In this work, the equivalent circuit of nonequilibrium charge collection shown in Fig. 1 is proposed.

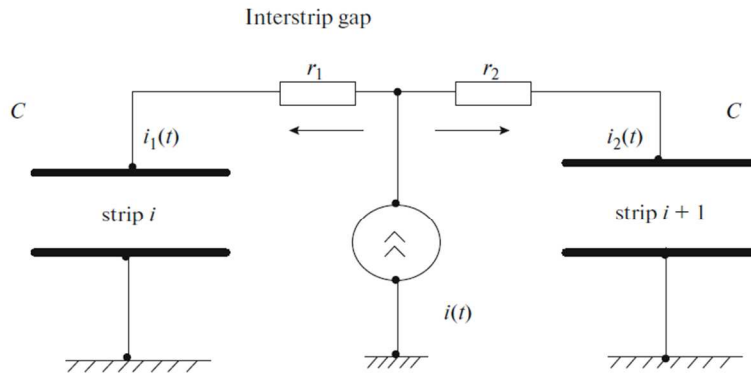


Fig. 1. Equivalent circuit of the process. Capacitance C corresponds to the effective value, which takes into account the input circuit of the charge-sensitive preamplifier. $C = C(\text{strip}) \parallel k \cdot C$ (feedback), where $k \gg 1$ (Kirchhoff's circuit laws are applied).

The initial system of equations is

$$\begin{cases} I(t) = i_1(t) + i_2(t) \\ \frac{i_1(t)}{C} + \frac{di_1(t)}{dt} r_1 = \frac{i_2(t)}{C} + \frac{di_2(t)}{dt} r_2 \end{cases} \quad (1)$$

The initial condition is $I(0) = 0$. Consequently, $i_1(0) = i_2(0) = 0$.

$$(a) \quad I(t) = C_0 \left(\frac{t}{T_p} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_p}\right). \quad (2)$$

From Eq. (1) we derive the expression $i_2(t) = I(t) - i_1(t)$ and substitute it into the second equation. As a result, we obtain the following first-order differential equation for the current $i_1(t)$:

$$\frac{di_1}{dt} (r_1 + r_2) + \frac{2i_1}{C} = \frac{I}{C} + \frac{dI}{dt} r_2. \quad (3)$$

Similarly, we obtain the differential equation for the second current

$$\frac{di_2}{dt} (r_1 + r_2) + \frac{2i_2}{C} = \frac{I}{C} + \frac{dI}{dt} r_1. \quad (4)$$

We arrive at the following solution of the homogeneous equation (3):

$$i_1(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (5)$$

Here $A = \text{const.}$ and $\tau = \frac{(r_1 + r_2)C}{2}$. Then, we find a partial solution of Eq. (3).

Substituting (5) into (3), we obtain the equation

$$\frac{dA(t)}{dt} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = \frac{I(t)}{2\tau} + \frac{dI(t)}{dt} \frac{r_2}{r_1 + r_2}. \quad (6)$$

Substituting (2) into (6), we obtain the formula for calculation of $A(t)$.

We obtain the following expression for the current $i_1(t)$:

$$i_1(t) = \left[\frac{C_0}{T_p^2} \frac{r_2}{r_1 + r_2} (tT + T^2) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) - \frac{C_0}{2\tau T_p} (tT + T^2) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right. \quad (7)$$

$$\left. - \frac{C_0 T}{T_p} \frac{r_2}{r_1 + r_2} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \text{const}_1 \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Using the initial condition $i_1(0) = 0$, we find from (7) that

$$\text{const}_1 = C_0 \left(\frac{T}{T_p} \frac{r_2}{r_1 + r_2} + \frac{T^2}{2\tau T_p} - \frac{T^2}{T_p^2} \frac{r_2}{r_1 + r_2} \right). \quad (8)$$

Similarly, for the current $i_2(t)$ we have

$$i_2(t) = \left[\frac{C_0}{T_p^2} \frac{r_1}{r_1 + r_2} (tT + T^2) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) - \frac{C_0}{2\tau T_p} (tT + T^2) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right. \quad (9)$$

$$\left. - \frac{C_0 T}{T_p} \frac{r_1}{r_1 + r_2} \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \text{const}_2 \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\text{const}_2 = C_0 \left(\frac{T}{T_p} \frac{r_1}{r_1 + r_2} + \frac{T^2}{2\tau T_p} - \frac{r_1}{r_1 + r_2} \frac{T^2}{T_p^2} \right). \quad (10)$$

Dependences of charges at the capacitors $Q_1(t)$ and $Q_2(t)$ can be obtained by simple numerical integration (to avoid more cumbersome analytical formulas for $Q_1(t)$ and $Q_2(t)$).

$$(b) \quad I(t) = C_0 \frac{t}{T_p} \exp\left(-\frac{kT}{T_p}\right) \quad (k \text{ is the constant}). \quad (11)$$

Substituting the expression into (6), we get

$$A(t) = \int \left\{ \frac{C_0}{2\tau} \left(\frac{t}{T_p} \right) \exp\left(-\frac{\kappa t}{T_p}\right) + \left[\frac{C_0}{T_p} \exp\left(-\frac{\kappa t}{T_p}\right) - \frac{C_0 \kappa}{T_p} \exp\left(-\frac{\kappa t}{T_p}\right) \right] \frac{r_2}{r_1 + r_2} \right\} \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt. \quad (12)$$

The following expression is obtained for the current $i_1(t)$:

$$i_1(t) = \left[\frac{C_0 \kappa}{T_p^2} \frac{r_2}{r_1 + r_2} (tT_1 + T_1^2) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{C_0}{2\tau T_p} (tT_1 + T_1^2) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{C_0 T_1}{T_p} \frac{r_2}{r_1 + r_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \text{const}_3 \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (13)$$

Using the initial condition $i_1(0) = 0$, we find from (12) that

$$\text{const}_3 = C_0 \left(\frac{T_1}{T_p} \frac{r_2}{r_1 + r_2} + \frac{T_1^2}{2\tau T_p} - \frac{T_1^2 \kappa}{T_p^2} \frac{r_2}{r_1 + r_2} \right). \quad (14)$$

Similarly, for the current $i_2(t)$ we have

$$i_2(t) = \left[\frac{C_0 \kappa}{T_p^2} \frac{r_1}{r_1 + r_2} (tT_1 + T_1^2) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{C_0}{2\tau T_p} (tT_1 + T_1^2) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{C_0 T_1}{T_p} \frac{r_1}{r_1 + r_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \text{const}_4 \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (15)$$

Using the initial condition $i_2(0) = 0$, we find from (15) that

$$\text{const}_4 = C_0 \left(\frac{T_1}{T_p} \frac{r_1}{r_1 + r_2} + \frac{T_1^2}{2\tau T_p} - \frac{T_1^2 \kappa}{T_p^2} \frac{r_1}{r_1 + r_2} \right). \quad (16)$$

Thus, option (a) is a particular case of option (b). In these equations, T_p is the plasma time [10].

2.2. Typical Temporal Dependences

A Charge.exe application was developed using C++Builder for investigating influence of the input parameters of the process (resistance, strip and pre-amplifier feedback capacitance, mean field in totally depleted detector, etc.) on the output temporal dependences. The total resistance $R = R_1 + R_2$ was chosen as the sample mean of the measurements between pairs of strips on the p - n junction side, namely, $(1.328, 1.318, 1.332, 1.257, 1.068, 1.034, 0.676, 0.691, 0.869, 0.992, 0.994, 1.011, 1.018, 0.924) = 0.8969$ k Ω . The plasma time T_p was calculated according to [10] for the average electric field in the depleted detector of about

70 V/300 $\mu\text{m} = 0.233$ V/ μm . The feedback capacitance and the gain k were taken to be 3 pF and 50000 respectively. The user's actions are two interactive steps: calculation of the plasma time (Button 1) and finding of i_1 and i_2 (Button 2).

Summing up, we can state that in addition to considering the quantitative characteristics of the output signals we may treat the behavior of the nonequilibrium charge as an analogy of the detector with a resistive strip. Specifically, in the case of the collection of the charge divided between two neighboring strips, we must have a small ballistic deficit, which is confirmed by the examples shown in Figs. 3a–3c in the next section. Note, that the results of the calculations are also visualized in the LabView environment (Fig. 3c).

2.3. Examples of Signals Divided between Two Neighboring Strips

Figures 3a and b show the data obtained for the ^{217}Th decay signals from the reaction $^{217}\text{Th} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{217}\text{Th} + 3n$ for the charge sharing under consideration between two neighboring strips on the p - n junction side and the detector bias voltage of 70 V. The depletion voltage of this high-resistance n -silicon detector (Micron Semiconductors, UK) was about 30 V.

It is worth noting that there is

—A ballistic defect of the amplitude ~ 30 keV on average (Fig. 3a).

—A small dip in the distribution (Fig. 3b), which is an analogy with the resistive layer.

This means that small corrections are necessary for knowing the precise value in the case of charge sharing between neighboring strips. Accordingly, the recoil matrix (ER, see [4]) should be filled as follows:

—At the current time t (obtained from the CAMAC module or the Windows precision timer with an accuracy of 1 μs), this time is written as a matrix element with the indices $\{i, j, j + 1\}$. Here i is the number of the front DSSSD strip, and j is the index of the minimum of two neighboring back strips ($0 \leq i \leq 47, 0 \leq j \leq 127$). The notation $\{i, j, j \pm 1\}$ seems to be redundant.

Figure 4 shows the number of double signals as a function of the effective bias voltage (the voltage drop at the filter resistor being taken into account). This dependence shows that parameters of the proposed numerical model can depend on the detector operation mode. The CAMAC module described in [11] has been used in the measurements.

3. IMPROVED REAL-TIME ALGORITHM OF THE ER- α - α TYPE

The authors do not exclude the possibility that after the high-intensity DC-280 cyclotron and the new gas-filled recoil separator [12] are put into operation at FLNR (scheduled for 2018), a more sophisticated algorithm than the currently used ER- α [13] may be

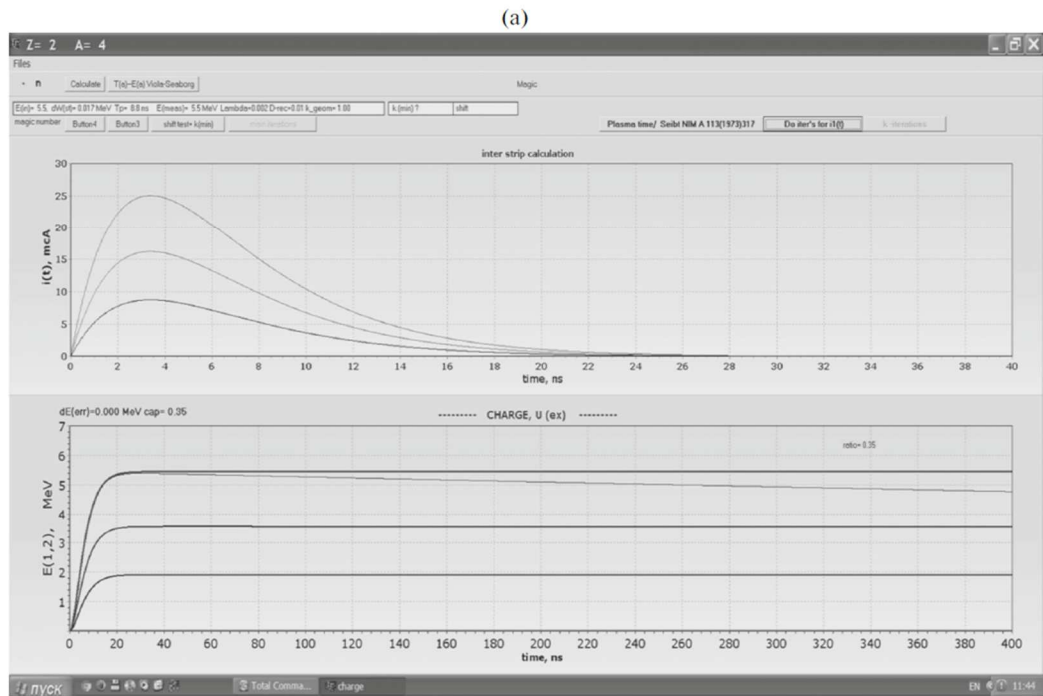


Fig. 2. (a) User's interface and typical temporal dependencies of the nonequilibrium-carrier current (top) and collected charge (bottom). (b) Representation in the LabView environment. The second (time-decaying) curve in the lower histogram is the output voltage of the charge-sensitive preamplifier.

required for searching for indications of the potential multilink alpha decay.

The Simula application (Windows, C++ Builder 6) was developed for simulating the use of the algorithms

like $ER-\alpha$, $ER-\alpha-\alpha$ b, and others in experiments with the new gas-filled recoil separator within the FLNR DC-280 project. Counting rates of the DSSSD focal plane detector are considered as a linear extrapolation

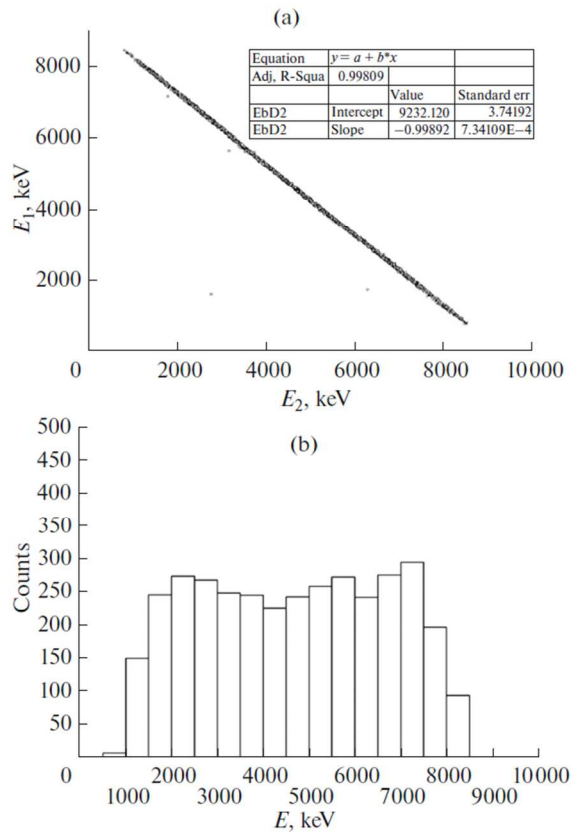


Fig. 3. (a) Dependence of the second signal energy on the first signal value for two neighboring strips for the ^{217}Th isotope. The total energy is about 30 keV lower than the nominal value. The equation of this straight line is $E_{\alpha 1} + E_{\alpha 2} = 9232 \pm 3.7$ keV, i.e., about 30 keV lower than the nominal value, that is, the alpha-particle energy in the ^{217}Th decay, which is 9261 keV. (b) Distribution of signal amplitudes for one strip if the signal from the adjacent strip has a nonzero value. There is a distinct dip at the center of the distribution.

of those for the existing GSN facility multiplied by a factor of about 10. The latter is dictated by that the design beam intensity for the most promising ions, ^{48}Ca and ^{50}Ti , for synthesis of new superheavy elements will be about 10 μA instead of ~ 1 μA at the existing U400 cyclotron. Figure 5a shows the main application interface. Two histograms in the figure are spectra of simulated signals in and off the beam respectively.

Figure 5b shows the background count line shape and the exponential analytical expression obtained in the reaction $^{240}\text{U} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow \text{FI}^*$ at the GNS facility. It is this approximation that was used for generating the set of signals. The number 9 in the upper left corner

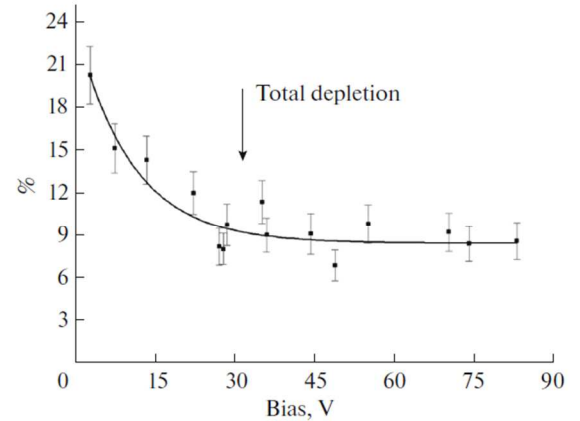


Fig. 4. Estimated dependence of the number of “double” signals on the effective bias voltage of the DSSSD detector for the source of alpha particles with the energy of 5.5 MeV.

indicates the number of beam interruptions within the interval of 23988 s. The interruption parameters were the correlation time $dt = 10$ ms (ER- α), the alpha decay energy interval of 9 to 12 MeV, and the pause of 20 s. The channel width in the histogram corresponds to 20 keV. Below, are characteristics of all of the nine beam interruptions. The first two columns are strip numbers, and the next three are the energies of the recoil nucleus and the first alpha particle, respectively. The fifth column is the file time, and the sixth column is the time interval between the recoil nucleus and alpha decay signals.

25	13	7900	10580	1683.800	0.004668
33	10	8780	11060	4588.267	0.000868
53	24	16820	11260	4778.898	0.005562
97	31	11900	10520	7792.851	0.000377
74	35	7320	10620	8641.333	0.001381
4	14	7720	9560	10399.042	0.009375
70	5	10260	10520	13824.113	0.001333
94	45	8600	11500	18907.293	0.007596
60	15	11940	9920	20860.953	0.002514

The fragment scale events (FF) are separately generated in the range of 50 to 250 MeV. The distribution shape is uniform. These events are presented in a separate histogram. They allow estimating the rate of decay chains, such as, for example, ER- α - α (beam interruption)- α -SF (off the beam)-(beam on again) and calculating probabilities of these or similar combinations. Comparative simulation results for two beam interruption algorithms (ER- α and ER- α - α) are presented in Tables 1 and 2 and Fig. 6 respectively. If the application finds an alpha decay off the beam in a certain energy range and at the same coordinates (X , Y), the interruption interval is prolonged by a factor of 5–

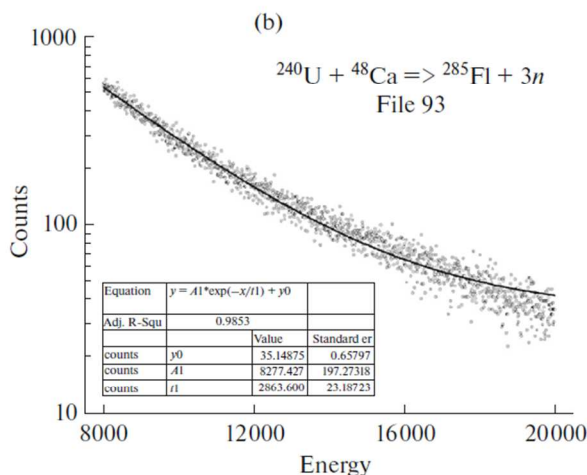
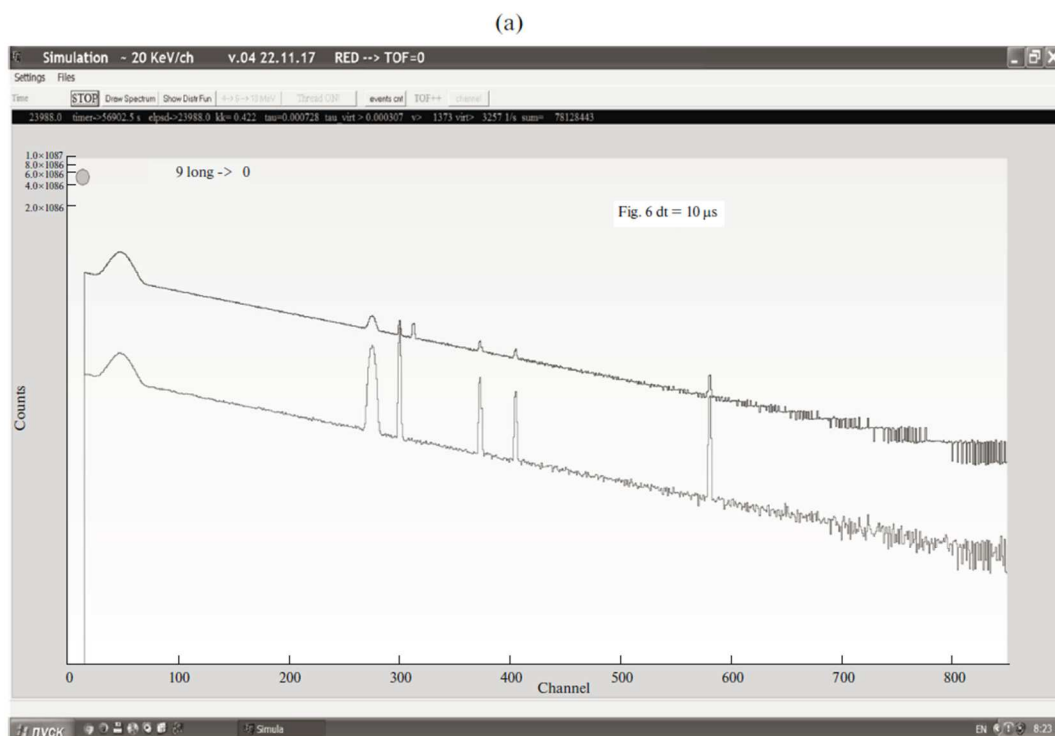


Fig. 5. (a) Application interface. Histograms are presented in logarithmic scale. (b) Line shape for signal spectrum generation. Points are experimental data, and the line is the approximation.

20 and the event is recorded in the same text file that contains previously recorded parameters of signals that led to the off-beam phase.

The above application was also used to perform a numerical experiment for testing an ER- α - α algorithm as an indicator of a potential multilink event and for generating beam interruptions. The result of the simulation for $\Delta t_1 = 10$ s, $\Delta t_2 = 15$ s, and $\nu \approx 2e + 3$ s⁻¹ was as follows: a total of 5964 interruptions were made

in 2577407 s, and only in one case an α particle was detected at the same coordinate in the off-beam phase. Thus, the estimate of the probability for a random coincidence of this type can be $P_{\text{err}} \approx 0.039$ d⁻¹.

The energy intervals were:

(7, 17) MeV for recoil nuclei;

(9, 11) MeV for both alpha particles.

Table 1. Interruption frequency rate for ER- α correlation

ER- α , s Δt (correlation time)	Interruption frequency, s ⁻¹
1	0.0358
0.5	0.0198
0.3	0.00801
0.1	0.00544
0.025	0.00178
0.010	0.000375

Table 2. Interruption frequency rate for ER- α - α correlation

ER- α - α , Δt_1 (ER- α), Δt_2 (α - α), s		Interruption frequency, s ⁻¹
$\Delta t_1 = 15$	$\Delta t_2 = 30$	0.0106
5	10	0.00171
2	5	0.00106
1	2.5	0.000167
0.75	1.4	0.000130

4. POSSIBILITY OF CONSTRUCTING A SMART DATA ACQUISITION SYSTEM: THE MAIN OBJECTS AND PRINCIPLES

In [14], the notion of the correlation graph was introduced. At the vertices of the graph there are matrices of the corresponding signals, namely, recoils and alpha particles of the corresponding energies, as shown in Fig. 7. Thus, the real DSSSD detector is virtually represented in the computer memory as $n \times 48 \times 128$ matrices.

In this representation of detected signals, each edge of the graph, like any of their combination, can be used to “trigger” background-free conditions for detection of subsequent decays. A total of these connections for a graph of n vertices is $N = \frac{n(n-1)}{2}$. Note that the ER- α algorithm is now used with a rigid

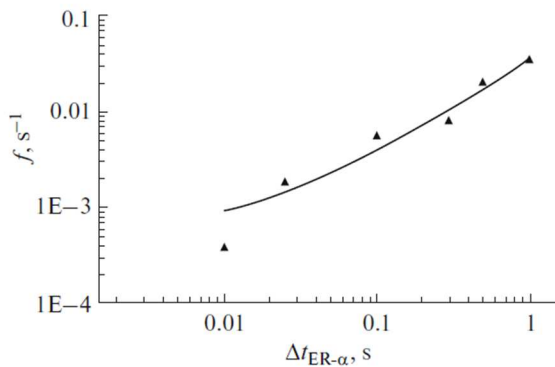


Fig. 6. Dependence of the interruption frequency rate on the correlation time parameter.

scheme of setting beam interruption conditions. Namely, in addition to the energy and time-of-flight intervals typical of recoil, energy and time windows are set for one or two alpha particles. In the future, especially at increased counting rates of the focal plane detector, a more flexible scenario might be possible. The difference is as follows (for simplicity, the ER- α algorithm is considered): in addition to the recoil and alpha-particle matrices, the count rate matrices corresponding to those two are determined. Naturally, the number of the matrix elements is dictated by the number of the elementary cells in the DSSSD detector. In our case, it is 48 vertical by 128 horizontal cells. Accordingly, after the data recording into file starts, the number of events of both types of interest is recorded in the corresponding cells. Thus, at any instant, we know the counting parameters for each cell X, Y . Naturally, in the vicinity of time $t = 0$, averages over the entire detector can be used as a first approximation.

A characteristic feature of this approach is that for satisfying the interruption conditions we may require the maximum possible time window, which will be individually determined for each cell by the condition $P_{\text{RND}}(X, Y, \Delta t) \leq \epsilon$, where P_{RND} is the probability for random coincidence of signals of the given type, Δt is the desired time interval, and ϵ is a small allowable number preset by the experimenter. It is this parameter

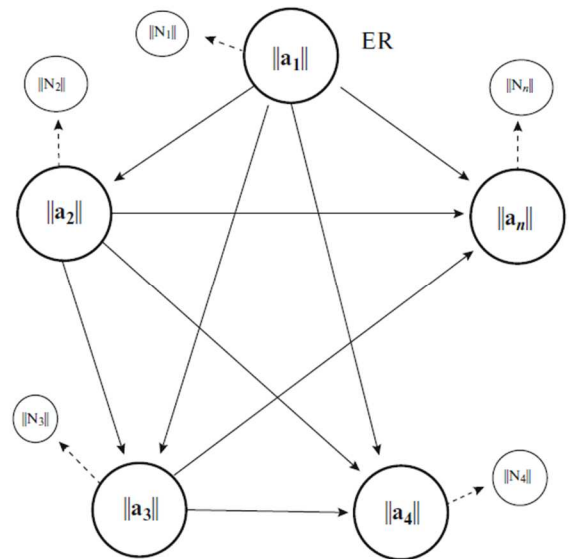


Fig. 7. Diagrammatic representation of the correlation graph. Objects $\|a_1\| \dots \|a_n\|$ are signal matrices. Usually, $\|a_1\|$ is the recoil nucleus matrix, and $\|a_2\| \dots \|a_n\|$ is the alpha particle matrix. Counting rate matrices colored gray. Matrix elements of the signal matrices are current detection times. Elements of the counting rate matrices $\|N_1\| \dots \|N_n\|$ are numbers of signals of the given type at the given time instant in the given cell.

that will determine the relative time loss for target irradiation. The probability can be calculated using the BSC (Background Signal Combinations [15]) or LDSC (Linked Decay Signal Combinations [16]) approaches or simpler versions that take into account specific features of the experiment using the active correlation method (see for example [17, 18]).

Current individual frequency rates of ER and α signals can be tracked, again as a first approximation, as averages, $v_{i,j}(t) \approx \langle v_{i,j}(t) \rangle \frac{f(t)}{\langle f(t) \rangle}$. Here i, j is the cell number (DSSSD pixel), $v_{i,j}$ is the desired frequency rate of the measured signal at the given time t , $\langle v_{i,j} \rangle$ is the average over the interval $(0, t)$, $f(t)$ is the counting rate at the time t for the entire detector, $\langle f(t) \rangle$ is its average at the time t . The Faraday cylinder current detection channel of the recoil separator can be added to the data acquisition system, which automatically ensures tracking of technological pauses in target irradiation, e.g., for replacing the crucible in the ion source (which takes a few days).

Next, we consider a possibility of estimating the average time loss during the target irradiation using count matrices of signals imitating recoil nuclei and their alpha decays as the input parameters. For the process in question, these are four $\mathbf{M} \cdot \mathbf{K}$ matrices, where \mathbf{M} and \mathbf{K} are the numbers of the horizontal and vertical DSSSD strips respectively. At any time instant, we can determine the probability of the random correlation frequency rate $f_{i,j}$. The random correlation frequency rate for the entire detector will be $v = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K f_{i,j}$. If τ_{pause} is the time of the single pause, the average irradiation time loss will be $\eta = v\tau_{\text{pause}}$. This relation calculated in real time can also be included in the additional condition for beam interruption in the form $\eta \leq \varepsilon_2$, where $\varepsilon_2 \ll 1$ is a preset small number.

5. MEASURED ENERGY OF THE IMPLANTED RECOIL NUCLEUS

In this section, we present three alternative ways of estimating the spectrum of the superheavy nuclei implanted in the silicon detector. One way, described in 5.1, is based on computer simulation of the spectrum of the heavy nuclei [19] by considering the energy loss and its fluctuations both in the silicon detector itself and in the working media of the recoil nucleus separator. Two other ways described in 5.2 and 5.3 are absolutely empirical.

5.1. Computer Simulation of the Detected-Energy Spectrum

Constructing a real-time algorithm in the framework of the active correlation method, one has to deal

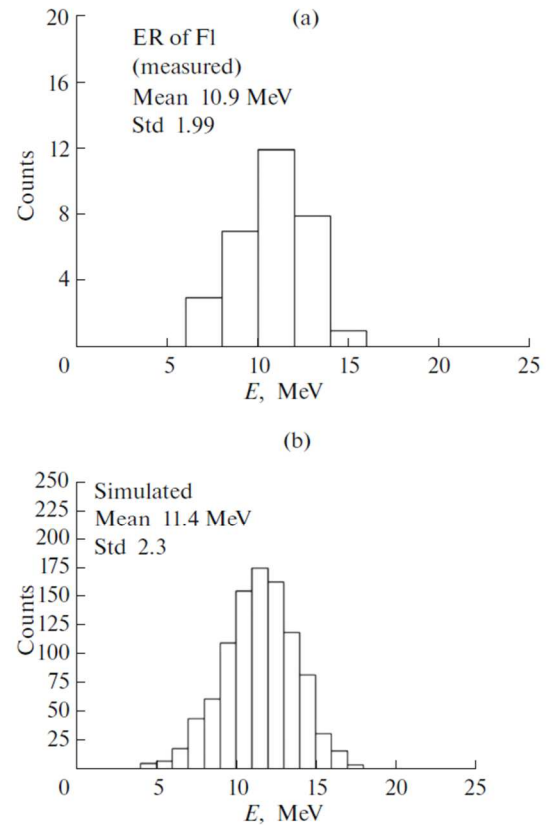


Fig. 8. (a) Measured amplitudes of signals from flerovium nuclei [19]. The average detected energy and the standard deviation are shown. (b) Calculated values for flerovium nuclei implanted in the silicon detector [22] for the GNS detector module. The same parameters as in Fig. 8a are shown.

with energy intervals when constructing an element of the recoil matrix. In [20, 21], a detection system based on the DSSSD focal detector and the $TOF-\Delta E_1-\Delta E_2$ low-pressure gas module [9] were used. Six decay chains of Fl isotopes were detected. The recorded energies of recoil nuclei were {11.4; 8.08; 9.45; 12.56; 10.2; 9.98} MeV. Figures 8a and 8b show calculated and measured signal amplitudes [22]. These six amplitudes are added to the histogram of measured values. Good agreement is obvious.

5.2. Calibration Relation for the Detection Module of the Gas-Filled Separator Based on the Array of Earlier Recorded Amplitudes of Implanted Nuclei

In [23], a formula was derived for the combined data from the GNS experiments with complete fusion reactions involving an actinide target + ^{48}Ca . An attempt was made to parametrize the result obtained

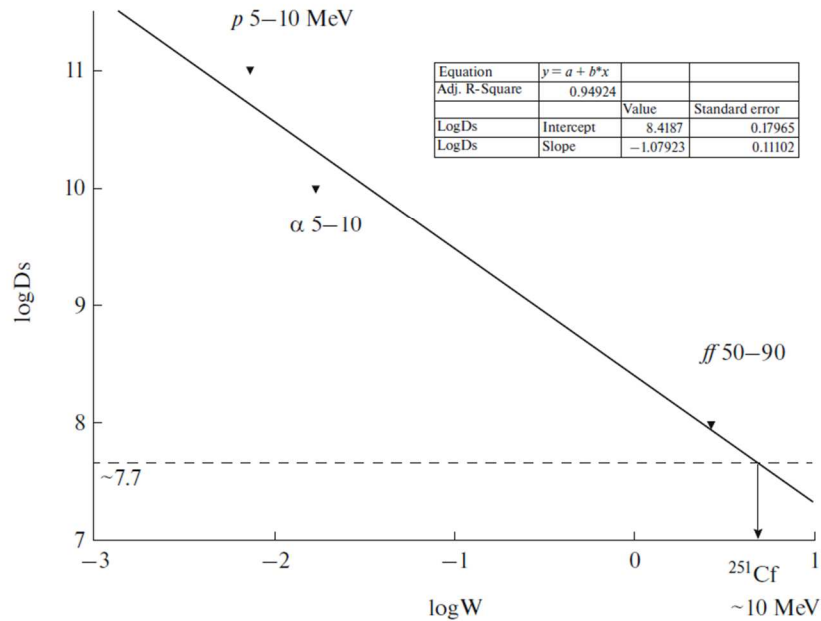


Fig. 9. Logarithmic dependence of the critical dose as a function of the energy loss due nuclear elastic collisions calculated by Wilkins's formula [30].

as a function of the charge of the implanted nuclide, namely, $\bar{E} \approx 25.9 - 0.125Z$, MeV, which is about 11.65 MeV for $Z = 114$. For the six amplitudes of the signals from the implanted flerovium nuclei, the average detected energy was $E = 10.3 \pm 1.6$ MeV, which in principle does not contradict the empirical relation. In view of the determination accuracy for the distribution centroid $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \frac{1.6}{\sqrt{6}} = 0.65$, we obtain a smaller value due to a larger size of the time-of-flight chamber for the module with the DSSSD detector.

5.3. Calibration Formula Based on Recoil Nuclei from Test Reactions

In [24], the following formula was obtained for describing the detected energy of an implanted nucleus as a function of the design input energy:

$$E(\text{meas}) = -2.05 + 0.73E(\text{in}) + 0.0015E(\text{in})^2 - (E(\text{in})/40)^3.$$

Here $E(\text{meas})$ is the measured average value, $E(\text{in})$ is the input energy before implantation in the silicon detector.

For the design input value of 13.32 MeV [25], the measured value of the centroid is in the region of 8 MeV, which is 2.3 MeV smaller than the measured average value.

6. RADIATION HARDNESS OF SILICON DETECTORS

Real-time operation of the gas-filled separator spectrometer requires perfect knowledge of calibration parameters. One of the factors responsible for their variation is the radiation hardness of silicon semiconductor detectors. This issue was studied in [26–28]. In [28], qualitative estimation of radiation damage was systematized using as a basis the average nonradiation loss (the loss due to nuclear interactions, which does not lead to generation of nonequilibrium electron–hole pairs). In [29], following the philosophy of the approach [28], the author found out that the critical dose of target-like ions can be smaller than 10^8 cm^{-2} , which is illustrated in Fig. 9. With heavy-ion intensities of 5 to 10 μA , this may constrain not only the use of the current calibration coefficients in the active correlation method but also the service life of the DSSSD detector proper.

7. CONCLUSIONS

(1) The role of edge effects in collection of non-equilibrium charge in the interstrip region of the DSSSD detectors operating in the total depletion mode is considered. The ballistic defect is measured for the alpha decay of the implanted ^{217}Th nucleus and found to be about 30 keV. It is shown that when using the active correlation method for formation of the recoil matrix (and the alpha decay matrix, if the

ER- α - α correlation is important), one should fill in the matrix elements $(i, j, j + 1)$, where i and j are the numbers of the vertical and horizontal detector strips respectively. A simple equivalent circuit of the process is proposed.

(2) A C++ Builder application is developed for numerical simulation of a complex real-time ER- α - α algorithm.

(3) A flexible interruption algorithm is proposed, which involves calculation of random real-time coincidence probabilities for each individual cell during the data acquisition. The authors do not exclude that this algorithm will become especially relevant when the FLNR high-intensity cyclotron DC-280 and the new gas-filled recoil separator are put into operation.

(4) The critical radiation dose of target-like californium nuclei is estimated.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to A.A. Voinov and V.G. Subbotin for their assistance. The work was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 16-52-55002.

REFERENCES

1. Yu. S. Tsyganov and A. N. Polyakov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **513**, 413–416 (2003).
2. Yu. Tsyganov and A. Polyakov, Cybernetics and Physics **3**, 85–90 (2014).
3. Yu. S. Tsyganov, Phys. Part. Nucl. Lett. **12**, 74–82 (2015).
4. Yu. S. Tsyganov, A. N. Polyakov, V. G. Subbotin, S. N. Iliev, A. M. Sukhov, A. A. Voinov, and V. I. Tomin, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **525**, 213–216 (2004).
5. Yu. S. Tsyganov, Phys. Part. Nucl. **40**, 822–846 (2009).
6. Yu. S. Tsyganov, Phys. Part. Nucl. Lett. **8**, 374–378 (2011).
7. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 022502 (2012).
8. Yu. Ts. Oganessian et al., Phys. Rev. C **74**, 044602.
9. Yu. S. Tsyganov et al., in *Proceedings of the 26th International Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC 2017), Budva, Montenegro, September 25–29, 2017*, pp. 309–317
10. W. Seibt, K. E. Sundström, and P. A. Tove, Nucl. Instrum. Methods **113**, 317–324 (1973).
11. L. Shlattaer et al., in *Proceedings of the 26th International Symposium on Nuclear Electronics and Computing (NEC 2017), Budva, Montenegro, September 25–29, 2017*, pp. 265–270.
12. A. G. Popeko, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B **376**, 144–149 (2016).
13. Yu. S. Tsyganov, *Low-Background Methods in Nuclear Physics* (Lambert Academic Publishing, 2017) [in Russian].
14. Yu. S. Tsyganov, in *Book of Abstracts of the International Conference “Mathematical Modeling and Computational Physics, 2017” (MMCP2017), Dubna, Russia, July 3–7, 2017* (Joint Inst. Nucl. Res., Dubna, 2017).
15. V. B. Zlokazov, Phys. At. Nucl. **66**, 1666–1670 (2003).
16. K.-H. Schmidt et al., Z. Phys. A **316**, 19–26 (1984).
17. Yu. Tsyganov, Phys. Part. Nucl. Lett. **6**, 59–62 (2009).
18. Yu. Tsyganov, Phys. Part. Nucl. Lett. **8**, 374–378 (2011).
19. Yu. S. Tsyganov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **378**, 356–359 (1996).
20. V. K. Utyonkov, N. T. Brewer, Yu. Ts. Oganessian, et al., Phys. Rev. C **97**, 014320 (2018).
21. V. K. Utyonkov, N. T. Brewer, Yu. Ts. Oganessian, et al., Phys. Rev. C **92**, 034609 (2015).
22. Yu. S. Tsyganov and A. N. Polyakov, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **558**, 329–332 (2006).
23. Yu. Tsyganov, A. Polyakov, A. Sukhov, and V. Zlokazov, “On-line data processing in the Dubna Gas Filled Recoil Separator experiments,” in *Proceedings of the International Conference “Mathematical Modeling and Computational Physics, 2011” (MMCP2011), Stara Lesna, Slovakia, July 4–8* (Springer, Berlin, 2012).
24. Yu. S. Tsyganov, “Synthesis of new superheavy elements using the Dubna Gas-Filled Separator: The complex of technologies,” Phys. Part. Nucl. **45**, 817–847 (2014).
25. V. K. Utyonkov, personal communication, 2018.
26. Yu. K. Akimov, V. F. Kushniruk, O. V. Ignat’ev, and A. I. Kalinin, *Semiconductor Detectors in Experimental Physics* (Energoatomizdat, Moscow, 1989) [in Russian].
27. Yu. P. Gangrskii, B. N. Markov, and V. I. Perelygin, *Registration and Spectrometry of Fission Fragments* (Energoizdat, Moscow, 1981), p. 92, Table 17 [in Russian].
28. M. Kurokava et al., “Radiation damage factor for ion-implanted silicon detectors irradiated with heavy ions,” IEEE Trans. Nucl. Sci. **42**, 163–166 (1995).
29. Yu. S. Tsyganov, Report at IEEE Nucl. Sci. Symposium, Strasbourg, France, November 04, 2016.
30. B. D. Wilkins et al., Nucl. Instrum. Methods **92**, 381(1971).

Translated by M. Potapov

Příloha B Spoluautorská publikace New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements

ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 557–560. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.

METHODS OF PHYSICAL EXPERIMENT

New Analog Electronics for the New Challenges in the Synthesis of Superheavy Elements¹

V. G. Subbotin^a, A. M. Zubareva^a, A. A. Voinov^{a,*}, A. N. Zubarev^a, and L. Schlattauer^b

^aJoint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Russia

^bPalacky University, Olomouc, 77146 Czech Republic

*e-mail: voinov@jinr.ru

Received January 12, 2016

Abstract—A new series of experiments aimed at the synthesis and study of decay properties of the most neutron-deficient isotopes of element Fl ($Z = 114$) and of the heaviest isotopes of 118 element is planned at the DGFRS (FLNR JINR). An appropriate registering system is to be implemented to transfer spectrometric data from double-sided silicon strip detector (DSSD). New analog modules were designed that allow to simplify existing multi-channel measurement system and to improve the real-time method of “active correlations” in search for the rare events of SHE formation and decay. The main features of the new modules the 16-channel charge-sensitive preamplifier, the 16-channel analog multiplexer and the 1.25 MSPS 12-bit Parallel ADC are presented.

DOI: 10.1134/S1547477116050435

INTRODUCTION

Significant success in the synthesis and decay properties studying of the superheavy nuclei ($Z \sim 114$ and $N = 184$) was achieved in the FLNR JINR (Dubna, Russia) during last 15 years [1]. Six new superheavy elements with $Z = 113–118$ and more than 50 new isotopes with $Z = 104–118$ were observed for the first time at the Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) in irradiations of the targets of $^{233,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , $^{245,248}\text{Cm}$, ^{249}Bk and ^{249}Cf with accelerated ^{48}Ca ions beam delivered by U-400 cyclotron.

All of these new nuclei were detected using an array of position-sensitive Si strip detectors in the focal plane of the DGFRS. For this purpose we first applied a 12-strip single-sided Si strip detector (SSSD), and later — a similar 32-strip detector (two 16-strip wafers), both from Canberra NV. Appropriate registering systems were designed and applied for the measurement of energy, position and time information from reaction products implanted into the detector and from their subsequent alpha-decay or spontaneous fission [2, 3].

The next step in exploring this “island of stability” of the superheavy nuclei could be study of new isotopes at the very edge of the new SHE region. For example, in irradiation of ^{239}Pu , ^{240}Pu targets with ^{48}Ca beam one could observe formation and decay of very light isotopes $^{284,285}\text{Fl}$ [4]. The heaviest isotopes of

elemnt118: $^{295}\text{118}$ and $^{296}\text{118}$ [5] could be produced in the reactions with targets of $^{249–251}\text{Cf}$.

NEW FOCAL-PLANE DETECTOR ARRAY AT THE DGFRS

The array of detectors at the DGFRS has been modified to improve the position resolution of recorded signals and to reduce accordingly the probability of observing sequences of random events that imitate decay chains of implanted nuclei. New detection system includes 0.3 mm thick double-sided silicon strip detector (DSSD) manufactured by Micron Semiconductor Ltd. This large DSSD has 1 mm wide strips, 48 at the front side and 128 at the back side, equal to 6144 pixels of 1 mm² in one Silicon wafer (to compare with 240 and 960 individual cells of formerly used 12-strip and 32-strip detectors, respectively). Such a high pixilation enables to achieve superior position resolution for registering recoil-correlated decay sequences and thus reducing number of potential random events. This detector of implanted recoils was surrounded by six side Si-detectors (MICRON), each 500 microns thick with an active area of 65 by 120 mm without position sensitivity. This new Si-detector array has been designed, assembled, commissioned off-line and provided by the Oak Ridge National Laboratory.

Signals from all the detectors are processed using MESYTEC linear-logarithmic preamplifiers [6]. Further, analog signals from preamplifiers were split into

¹ The article is published in the original.

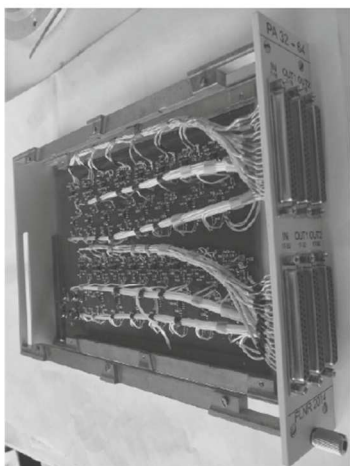


Fig. 1. PA32-64 – 32-input splitter-amplifier module.

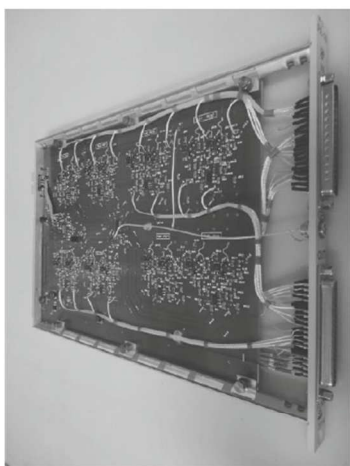


Fig. 2. 16-channel charge-sensitive preamplifier with auto-calibration mode.

two independent measurement branches. Special analog splitter-amplifier PA32-64 (Fig. 1) was designed by DGFRS group as 4M CAMAC module to provide sharing of every spectroscopic channel between two measuring branches. The transfer factor from input to output is 1.1. For better precision and stability, precision resistors with tolerance of 0.1% and low temperature coefficient of 25 ppm/°C were used in gain circuits. Every module splits 32 input signals into two independent output 32-channel streams. First 32 outputs go to analog registering system of the DGFRS similar to that used in previous experiments [7]; the other 32 outputs – to 50 Ohm-inputs of digital system based on XIA PIXIE-16 modules provided by ORNL [8]. Thus, all the spectroscopic signals from focal

plane detectors (48 plus 128 from DSSD, plus 6 from side SSSD and one from rear detector used in “VETO-mode”) together with signals from “START” and “STOP” multi-wire proportional chambers were processed simultaneously by two different (“analog” CAMAC based and “digital” PIXIE-16 based) registering systems.

DESIGN OF NEW ELECTRONIC MODULES

With the aim of improving energy resolution of the individual spectroscopy channels, a new 16-channel charge-sensitive preamplifier PA-16 (Fig. 2) was designed and tested by DGFRS group. This should have good stability and linearity in wide particle energy range from 1 up to 250 MeV. For this purpose, we chose dual operational amplifier AD8066 (Fast-FET, 250 MHz) by Analog Devices with low-noise input FET transistor BF861 (by Phillips) and high-speed voltage feedback [9]. For calibrating individual channels with external generator, the CMOS low-voltage 16-channel ADG706 multiplexer [9] was applied in de-multiplexing mode. It switched the input pulse from the precision spectroscopic pulse generator to one of the 16 outputs with a number chosen by address code preset in special logical module UPOG (detailed description of the method in [10]). The main characteristics are presented below and in table:

- ✓ Input/Output polarity – Inverted
- ✓ Energy sensitivity (Si) – 8 mV/MeV
- ✓ Noise output performance – See Table 1
- ✓ Negative feedback constant – 10 M Ω /5.6 pF
- ✓ Power supply +6 V 200 mA
–6 V 110 mA

Another development of the operating “analog” registering system is associated with attempts to reduce the total system “dead-time” of data recording and to optimize the method (“active-correlation method”) of the on-line search for “recoil – alpha-particle” or “recoil – SF” correlations when performing the experiments on synthesis and study of the SHE.

Application of this method [11] developed in DGFRS research group allows to stop the ion beam from the cyclotron after detecting “candidate” correlation within energy and time intervals corresponding to decays of parent and/or daughter nuclei in the same position on detector. Thus, the beam-associated background of various nature in the separator’s focal plane is strongly reduced.

Experimental data characterizing the incoming events in the “analog” CAMAC-based registering system are recorded after spectroscopic signals from 48 front strips and 128 rear strips of the DSSD are processed by measuring SAR ADC. Every ADC is working in combination with a 16-channel analog multiplexer (MUX) that reduces the total number of the

Noise performance measured for PA-16 using the ORTEC 575A spectroscopy amplifier set at 1.5 μ s, near-Gaussian shaping

C_{source} , pF	Noise, keV, FWHM, Si	Rise time, nanoseconds
0	5	26
70	10.5	30
132	14	40
175	16	60
225	17.5	90

measuring channels and gives the code number of the working strip like in [2]. Thus, we can measure the particle energy and its position in focal plane detector's area using three couples of MUX-ADC for serving the 48 front strips of DSSD and eight MUX-ADC couples – for serving the 128 rear strips. In fact, we measure the energy of the detected particle in the DSSD twice (using separate ADCs for signals from front and rear detectors). In CAMAC-based registering system the total “dead-time” can be reduced if the conversion time of each ADC is short enough and the number of ADCs to be read in CAMAC cycle is minimum (yet, without loss of experimental data). With this aim in view, a new fast analog multiplexer and a new 12-bit ADC were designed (0.8 μ s conversion time, compare with 40 μ s in [12]). On the other hand, new system for determining coordinate of detected particles from 128 rear strips was proposed and constructed. It consists of four individual modules CD32-5 that produce binary code “1 strip of 32” each and primary register PKK-05 producing final code “1 of 128 strips”. Every coder CD32-5 has 32 spectroscopic inputs with adjustable amplitude threshold from 30 to 300 mV. The scheme AD8564 [9] works as fast trigger

and gives TTL-compatible signal to priority coder (realized in programmable logical array on EPM7128SLC-15N from ALTERA Corp.) if an input signal exceeds the preset threshold level. At the output each module gives the logical 5-bit code corresponding to the launched channel, one of thirty two. Special module – “pre-register” PKK-05 reads these 5-bit binary codes from four modules and sums these into a single 7-bit code. This binary 7-bit code is transmitted to CAMAC input register to be read by crate-controller (Fig. 3). This way we minimize the number of modules to be read in CAMAC cycle from eight to one and get the digital address of the strip with the detected event. Thus, the total “dead-time” is reduced by about 10 μ s. Further improvement can be made with developing new spectroscopic amplifiers with lower shaping time of signals.

CONCLUSION

—Two independent registering systems (“digital” and “analog”) are implemented in the new experiments on synthesis of SHE with new DSSD array;

—The new 16-channel spectrometric charge-sensitive preamplifier with energy resolution 5 keV is designed and tested to be further used in the DSSD-based measuring system;

—The new fast serial approximation ADC and 16-input Multiplexer are manufactured to process signals from the front DSSD 48 strips;

—The new system for coding the strip number for 128 rear strips is manufactured;

—The new modules should be built into the new measuring system and tested in the experiment with an aim of obtaining better energy resolution and shorter “dead-time”.

ACKNOWLEDGMENTS

The present work was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research by grants nos. 13-02-12052 and 16-52-55002; and by Moscow Region Government through Grant no. 736/36-16.09.2014. Also this work was partially supported by the internal student grant IGA of Palacký University in Olomouc, Czech Republic, no. IGA_PrF_2015_017.

REFERENCES

1. Yu. Ts. Oganessian and V. K. Utyonkov, “Super-heavy element research,” *Rep. Prog. Phys.* **78**, 036301 (2015).
2. Yu. S. Tsyganov, V. G. Subbotin, A. N. Polyakov, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **392**, 197 (1997), Yu. S. Tsyganov, V. G. Subbotin, A. N. Polyakov, et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **525**, 213–216 (2004).
3. Yu. S. Tsyganov et al., in *Proceedings of the 24th International Symposium on Nuclear Electronics and Comput-*



Fig. 3. CD32-5 and PKK-05.

- ing *NEC 2013, Varna, Bulgaria, Sept. 9–16, 2013*, pp. 250–256.
4. V. K. Utyonkov et al., “Experiments on the synthesis of super-heavy nuclei ^{284}Fl and ^{285}Fl in the $^{239,240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reactions,” *Phys. Rev. C* **92**, 034609 (2015).
 5. J. B. Roberto et al., in *Proceedings of the 5th International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, 2012*, Ed. by J. H. Hamilton and A. V. Ramayya (World Scientific, Singapore, 2014), p. 287.
 6. M. M. Rajabali et al., *Phys. Rev. C* **85**, 034326 (2012), Mesytec KG, Multichannel Logarithmic Preamplifier. <http://www.mesytec.com>.
 7. Yu. Ts. Oganessian et al., *Phys. Rev. C* **87**, 054621 (2012).
 8. R. Grzywacz et al., *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. B* **261**, 1103 (2007).
 9. www.analog.com.
 10. A. A. Voinov, V. G. Subbotin, and A. M. Zubareva, in *Proceedings of the 24th International Symposium on Nuclear Electronics and Computing NEC 2013, Varna, Bulgaria, Sept. 9–16, 2013*, pp. 270–275.
 11. Yu. S. Tsyganov and A. N. Polyakov, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **513**, 413 (2003), *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **558**, 329–332 (2006), *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A* **573**, 161 (2007).
 12. V. G. Subbotin and A. N. Kuznetsov, JINR Report 13-83-67 (Joint Inst. Nucl. Res., Dubna, 1983).

Příloha C Spoluautorská publikace NEW PARTICLE POSITION DETERMINATION MODULES FOR DOUBLE SIDED SILICON STRIP DETECTOR AT DGFRS

*Proceedings of the XXVI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017)
Becici, Budva, Montenegro, September 25 - 29, 2017*

NEW PARTICLE POSITION DETERMINATION MODULES FOR DOUBLE SIDED SILICON STRIP DETECTOR AT DGFRS

**L. Schlattauer^{1,2}, V.G. Subbotin¹, A.M. Zubareva¹, Y. S. Tsyganov¹,
A.A. Voinov¹**

*1 Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, Dubna,
Moscow region, 141980, Russia*

*2 Department of Experimental Physics, Faculty of Science, Palacký University, 17. listopadu
1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic*

E-mail: leo.schlattauer@upol.cz

New particle position determination modules for double-sided silicon strip detector (DSSD) were designed that allow to simplify existing multi-channel measurement system in search for the rare events of super heavy elements formation at DGFRS. The main principle is to search position correlated sequences of implanted SHE and followed by alpha-particles/or SF events above predefined threshold energy level in real-time for all 128 back strips. The resulting information is about providing the address of active strip and the coincidence sign. The newly developed system trigger passed the prototyping stage and is about to use in next experiment. This system will reduce the overall system dead time. This article is about describe in deep of the CD32-5M coder units and the PKK-05 preregister which are together the main part of the developed position determination subsystem.

Keywords: DGFRS, DSSD, SHE, Triggering, Data Acquisition, Nuclear electronics

© 2017 L. Schlattauer, V.G. Subbotin, A.M. Zubareva, Y. S. Tsyganov, A.A. Voinov

1. Introduction

The pioneering research of the predicted domain of enhanced stability of the super heavy nuclei around $Z \sim 114$ and $N=184$ was performed in the FLNR JINR (Dubna, Russia) during last 15 years [1]. Six new super heavy elements with $Z = 113-118$ and more than 50 new isotopes with $Z = 104-118$ were observed for the first time at the Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) in irradiations of the targets of $^{233,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , $^{245,248}\text{Cm}$, ^{249}Bk and ^{249}Cf with accelerated ^{48}Ca ions beam delivered by U-400 cyclotron.

These new nuclei were detected using arrays of position-sensitive Si strip detectors (manufactured by Canberra NV, Belgium) in the focal plane of the DGFRS of two kinds, with 12 strips and 32 ones. Appropriate registering systems were designed and applied for the measurement of energy, position and time information from reaction products implanted into the detector and from their subsequent alpha-decay or spontaneous fission [2, 3]. Recently the array of detectors at the DGFRS has been modified to improve the position resolution of recorded signals and to reduce accordingly the probability of observing sequences of random events that imitate decay chains of implanted nuclei (fig. 1).



Figure 1. The assemblage of the new DSSD (48×128 strips of 1 mm width) with $48 \times 128 \text{ mm}^2$ active area in focal plane and of six side SSSD

New detection system includes 0.3mm thick double-sided silicon strip detector (DSSD) manufactured by Micron Semiconductor Ltd. This large DSSD has 1-mm wide strips, 48 at the front side and 128 at the back side, equal to 6144 pixels of 1 mm^2 in one Silicon wafer (to compare with 240 and 960 individual cells of formerly used 12-strip and 32-strip detectors, respectively). Such a high pixilation enables to achieve superior position resolution for registering recoil-correlated decay sequences and thus reducing number of potential random events. This detector of implanted recoils was surrounded by six side Si-detectors (MICRON), each 500 microns thick with an active area of 65 mm by 120 mm without position sensitivity. This new Si-detector array has been designed, assembled, commissioned off-line and provided by the Oak Ridge National Laboratory.

Signals from all the detectors are processed using MESYTEC linear preamplifiers [4]. Further, analog signals from preamplifiers were split into two independent measurement branches. Special analog splitter-amplifier PA32-64 was designed by DGFRS group as 4M CAMAC module to provide sharing of every spectroscopic channel between two measuring branches. Transfer factor from input to output is 1.1. For better precision and stability, precision resistors with tolerance of 0.1% and low temperature coefficient of $25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ were used in gain circuits. Every module splits 32 input signals into two separate output 32-channel streams. First 32 outputs go to analog registering system of the DGFRS, like what was used in previous experiments [5]; the other 32 outputs go to 50Ω digitizer inputs based on XIA PIXIE-16 modules provided by ORNL [6]. To split the all spectroscopic signals from 183 individual measuring cells of the focal plane detectors (48 plus 128 from DSSD, plus 6 from side SSSD and one from backplane detector used in "VETO-mode") six modules of the

splitters PA32-64 were produced. Thus, all the spectroscopic signals together with signals from “START” and “STOP” multi-wire proportional chambers were processed by two different (“analog” CAMAC based and “digital” PIXIE-16 based) registering systems simultaneously, providing additional confidence in validity of performed data analysis.

2. Development of coordinate determination units

Another development of the operating “analog” registering system is associated with attempts to reduce the total system dead-time of data recording and to optimize the method (active-correlation method) of the on-line search for “recoil – alpha-particle” or “recoil – SF” correlations when detecting nuclei of the SHE and their decays.

Application of this method developed in DGFRS research group [7] allows to stop the ^{48}Ca ion beam from the cyclotron after detecting of candidate correlation sequence within energy and time intervals corresponding to decays of parent and/or daughter nuclei in the same position on detector. Thus, the background event rate in the separator’s focal plane associated with ions beam, target-like nuclei and transfer-reactions products is strongly reduced. As an example, total energy spectra of beam-on α -like signals and beam-off α particles and total fission-fragment energy spectra, both beam-on and beam-off are shown in fig. 2, a) and b) correspondently. The arrows point the energies of events observed in the correlated decay chains.

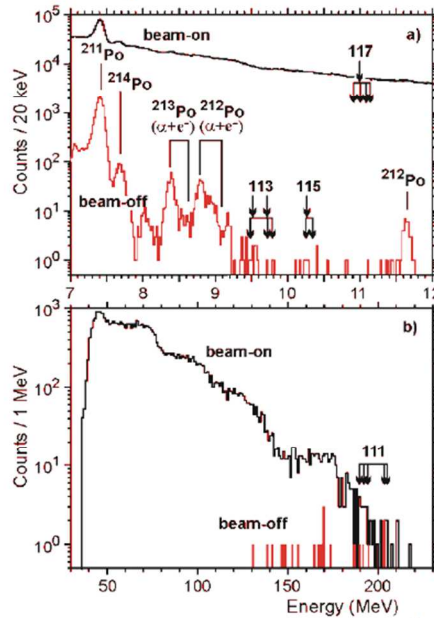


Figure 2. Energy spectra recorded during the 252MeV $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ run [8]

Amplitude of the signals of the detected events in the “analog” CAMAC-based registering system are recorded after spectroscopic signals from 48 front strips and 128 rear strips of the DSSD are processed by measuring SAR ADCs. Every ADC works in combination with a 16-channel analog multiplexer (MUX) that reduces the total number of the measuring channels and gives the code number of the working strip [2]. Thus, we can measure the particle energy and its position in focal plane detector’s area using three couples of MUX-ADC for serving the 48 front strips of DSSD and eight MUX-ADC couples for serving the 128 rear strips. In fact, we measure the energy of the detected particle in the DSSD twice (using separate ADCs for signals from front and rear detectors simultaneously). In CAMAC-based registering system the total “dead-time” can be reduced if the conversion time of each ADC is short enough and the number of ADCs to be read in CAMAC is minimum with this aim in view, a new fast analog multiplexer and a new 12-bit SAR ADC were designed (0.8 μs conversion time, compare with 40 μs in [9]).

On the other hand, new system for determining coordinate of detected particles from 128 rear strips was proposed and constructed. It consists of four individual modules CD32-5 that produce - binary code “1 strip of 32” each and primary register PKK-05 producing final code “1 of 128 strips”. Every coder CD32-5 has 32 spectroscopic inputs with adjustable amplitude threshold from 5 mV to 300 mV with its viewing in front panel display (fig. 3).

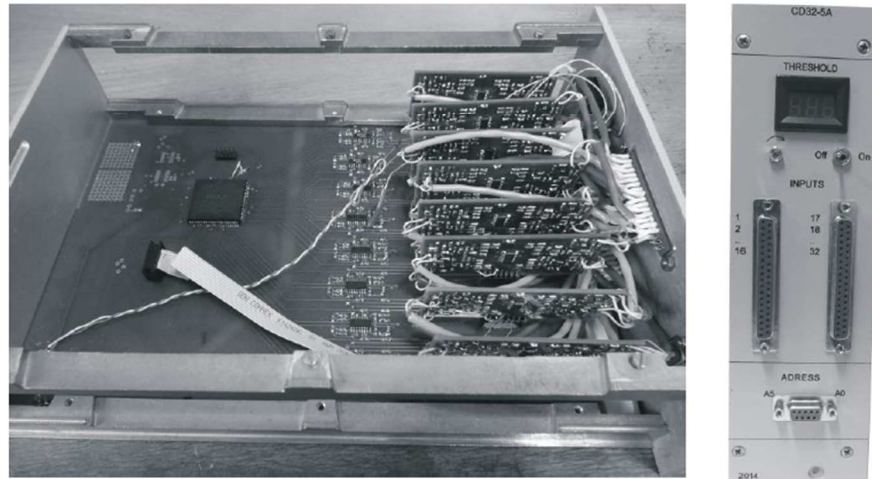


Figure 3. Lay-out of analog and digital parts in CD32-5 prototype and front panel view are shown

The common threshold level can be adjusted for all 32 channels in the module. The AD8564 quad 7 ns comparator [10] works as fast trigger with signals after additional amplification by factor 8 (eight vertical PCBs in fig. 3) and produce logical signal to priority coder if amplitude of input signal exceeds the preset threshold level of the comparator. At the output, each module gives the logical TTL-compatible 5-bit binary code corresponding to the channel. CD32-5 produces also additional output bit for “majority marker” if there were any two neighboring channels worked at the same time. The logical scheme for output code formation based on EPM7128SLC-15N chip application for 32 input channels is shown in fig. 4.

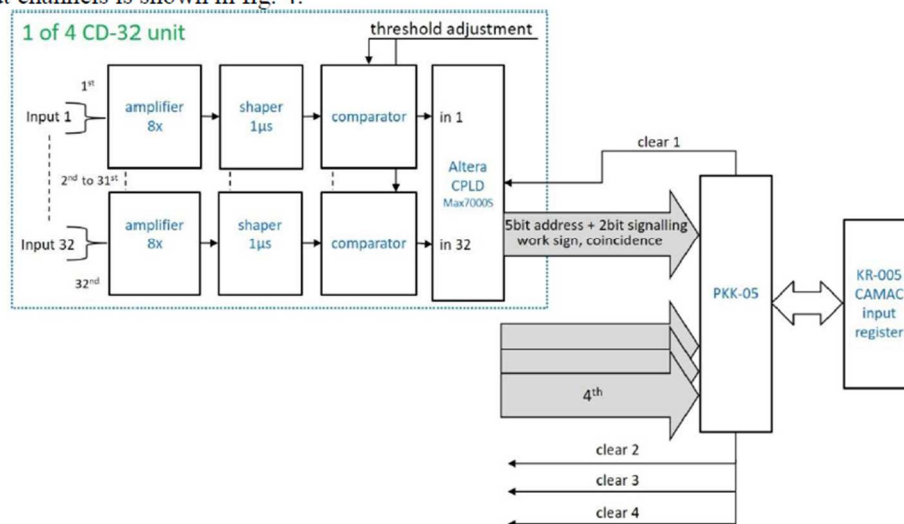


Figure 4. The logical scheme of binary position encoder for 32 channels in CD32-5

Specially designed module – “pre-register” PKK-05 – takes these 5-bit binary codes from four modules CD32-5 and combines these four codes into output 7-bit code (fig. 5 and fig. 6). This binary 7-bit code is transmitted to CAMAC input register KP-005 [11] to be read by crate-controller. The block function of PKK-05 is shown in fig. 6. The output signal levels are TTL compatible. Both CD32-5 and PKK-05 performed as CAMAC 4M and 1M wide modules, they apply only the

advantage of CAMAC-crate power supply. So, instead of reading data words of 4 coders, one should read just one data word from KP-005 to obtain data about the strip number among 128 rear strips of focal plane detector. Reading just two data words from one MUX-ADC couple and from register KP-005 one can obtain full info about energy and two-dimensional position of registered charged particle in DSSSD. It helps to minimize the number of modules to be read in CAMAC cycle from eight to one and to get the digital address of the strip with the detected event when serving the rear 128 strips of the DSSSD.



Figure 5. Encoding system “1 from 128” for rear DSSD strips in the individual CAMAC bin

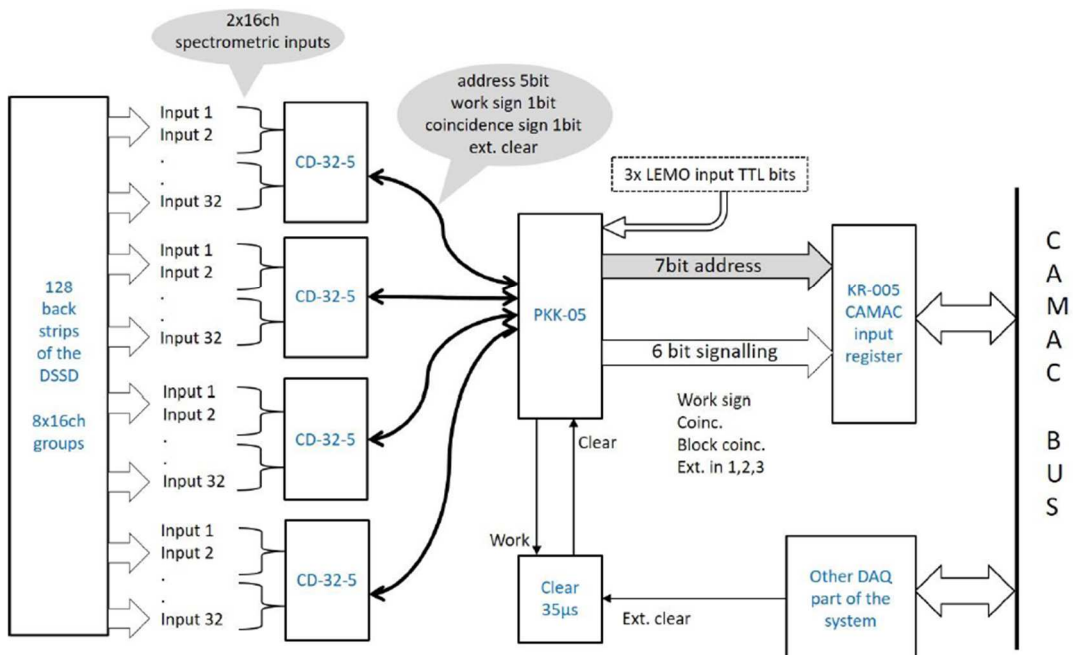


Figure 6. The functional block-diagram the encoder of “1 of 128 strips” into 7-bit code plus signaling

3. Conclusion

- ✓ The subsystem prototype consisting of four 32-inputs modules for coding the strip number for 128 rear strips of DSSD is manufactured. Maximum event rate is 100KHz.
- ✓ Just one CAMAC 1M station is needed to be read for launched rear strip determination in “analog” registering system. Now the coordinate determination system is under testing in real experiment conditions with usage of DSSD array.
- ✓ Subsystem provides also event sign, coincidence sign based on 25ns time window plus inter-block coincidence.
- ✓ Using this created subsystem prototype will improve the total system “dead-time” by ~15 μ s.
- ✓ System is software configurable in digital logic sections thanks to Altera MAX7000s series PLDs. So, the new features can be added by new chip software based on request.
- ✓ The convenient code debug testing tool was designed during development for easy tuning the individual coders CD32-5 and the system in general.

4. Acknowledgments

The present work was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research by grants No. 13-02-12052 and No. 16-52-55002; and by Moscow Region Government through Grant No. 736/36-16.09.2014. Also, this work was partially supported by the internal student grant IGA of Palacký University in Olomouc, Czech Republic, No. IGA_PrF_2015_017.

References

- [1] Yu. Ts. Oganessian and V. K. Utyonkov Super-heavy element research. // Rep. Prog. Phys. **78**, 036301 (2015).
- [2] Yu. S. Tsyganov Yu S, V. G. Subbotin, A. N. Polyakov, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sec. A 392, 197 (1997). Yu. S. Tsyganov Yu S, V. G. Subbotin, A. N. Polyakov, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sec. A 525, pp. 213-216 (2004).
- [3] Yu. S. Tsyganov. *et al.* // Proceedings of the XXIV International Symposium on Nuclear Electronics and Computing “NEC’2013”, Varna, Bulgaria, September 9-16, 2013, pp.250-256.
- [4] M. M. Rajabali *et al.* // Phys. Rev. C 85, 034326 (2012); Mesytec GmbH & Co. KG, Multichannel
Logarithmic Preamplifier, <http://www.mesytec.com>.
- [5] Yu. Ts. Oganessian *et al* // Phys. Rev. C **87**, 054621 (2013).
- [6] R. Grzywacz *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect B 261, 1103 (2007).
- [7] Yu. S. Tsyganov Yu S, A. N. Polyakov, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 513 (2003) 413; A 558 (2006) 329-332; A 573 (2007) 161
- [8] Yu. Ts. Oganessian *et al.* // Phys. Rev. Lett. 104, 142502 (2010).
- [9] V. G. Subbotin, A. N. Kuznetsov, JINR Report 13-83-67, Dubna, 1983.
- [10] www.analog.com AD8564 quad 7 ns comparator
- [11] N.I.Zhuravlev *et al.*, JINR Report 10-8114, Dubna, 1974.

Příloha D Spoluautorská publikace AN UPGRADED E-TOF- ΔE_1 - ΔE_2 BASED SPECTROMETER OF THE DUBNA GAS-FILLED RECOIL SEPARATOR

AN UPGRADED E-TOF- ΔE_1 - ΔE_2 BASED SPECTROMETER OF THE DUBNA GAS-FILLED RECOIL SEPARATOR

Yu.S. Tsyganov^a, A.N. Polyakov, A.A. Voinov, L. Schlattauer, M.V. Shumeiko, S.V. Barinova

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, Dubna, Moscow region, 141980, Russia

E-mail: ^a tyra@jinr.ru

Two scenarios of modifying the *DGFRS* (the Dubna Gas Filled Recoil Separator) spectrometer of rare alpha decays are under consideration. Both of them imply use of integral 1M CAMAC analog-to-digital processor *TekhInvest* ADP-16 [1,2] as a basic unit in the spectrometer design. In scenario a) special unit (PKK-05) [3] will be used to measure horizontal position of the signal, without measuring its energy, whereas in scenario b) a complete amount (12 modules ADP-16 for 48x128 strips of DSSSD) are used to measure both energy and position signals. To measure signals of charged particles coming from cyclotron an upgraded gaseous low pressure TOF- ΔE_1 - ΔE_2 module is used. To store TOF- ΔE_1 - ΔE_2 information specific 1M module *TekhInvest* PA-3n-tof is used. First results of trial runs using the specific *TekhInvest* IMI-2011 pulser and test nuclear reaction $^{nat}Yb+^{48}Ca \rightarrow Th^*$ are presented. New algorithm to search for ER- α - α ... α (SF) sequences in a real-time mode is discussed taking into account commissioning in the nearest future of the new FLNR *DC-280* cyclotron that is to provide beams of very high intensity [4]. An equivalent circuit for two neighbor strips of p-n junction side is proposed. It predicts a small non-linear ballistic effect for signals originating in inter-strip p-n junction area. Additionally, authors define abstract mathematical objects, like *correlation graph* and incoming *event matrixes* of a different nature to construct in a simple form a rare event detection procedure in a more exhaustive relatively the present one, using real-time detection mode. In that case one can use every from $n \cdot (n-1)/2$ *correlation graph* edges are used as a “trigger” for beam irradiation pauses to provide a “background free” condition to search for ultra rare alpha decays. Here n is a correlation graph nodes number. Schematics of these algorithms are considered.

Keywords: DSSSD detector, cyclotron, real-time method, position resolution, correlation

@ 2017 Yuri S.Tsyganov, Alexandr N. Polyakov, Alexey A.Voinov, Leo Schlattauer, Maksim V. Shumeiko, Sofia V. Barinova

1. Introduction

The existence of superheavy elements (SHE) was predicted in the late 1960-s as one of the first outcomes of the macroscopic-microscopic theory of atomic nucleus. Modern theoretical approaches confirm this concept. To date, nuclei associated with the “island of stability” can be accessed preferentially in ^{48}Ca -induced complete fusion nuclear reactions with actinide targets. Successful use of these reactions was pioneered employing the Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) [1] at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR) in Dubna, Russia. In the last two decades intense research in SHE synthesis has taken place and lead to significant progress in methods of detecting rare alpha decays. Method of “active correlations” used to provide a deep suppression of background products is one of them. Significant progress in the detection technique was achieved with application of DSSSD detectors. Note that applying the method of “active correlations” with DSSSD detector is even more effective compared with the case of resistive PIPS detector. On the other hand, some specific effects take place and possible sharing registered signal between two neighbor strips from p-n junction side is one of them.

2. Detection Module of the DGFRS: Present Status

The DGFRS is one of the most effective facilities in use for the synthesis of SHE. Using this facility it has been possible to obtain more than fifty new superheavy nuclides. In long-term experiments aimed to the synthesis of SHE one should take into account that yield of the products under investigation is small enough, usually – one per days – one per month, thus the role of the detection system and focal plane detector is quite significant as well as beam intensity requirements. Since 2015, to increase the position granularity of the detectors, which reduces the probability of observing sequences of random events that could be imitate decay chains of synthesized nuclei, the new focal plane detector has been used. It consists of $120 \times 60 \text{ mm}^2$ 48x128 strips Micron Semiconductor Double Side Silicon Strip Detector (DSSSD). Design of this detector and CAMAC spectrometer of the DGFRS are shown in the Fig.1a,b.

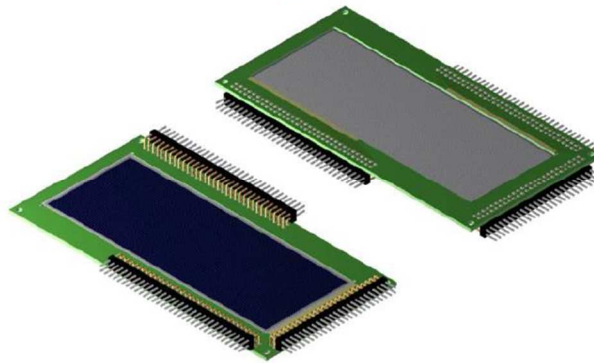


Figure 1a. DSSSD 48x128 strips focal plane detector of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator spectrometer

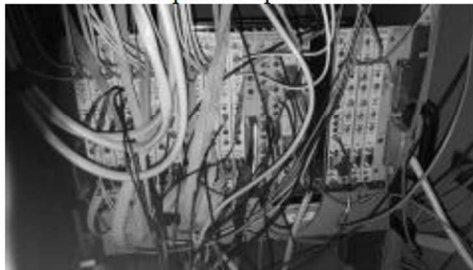


Figure 1b. View of the DGFRS CAMAC based spectrometer main crate

The detection system of the DGFRS was calibrated by registering the recoil nuclei and decays (α , SF) of known isotopes of No and Th and their descendants produced in the reactions $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)$ and $^{nat}\text{Yb}(^{48}\text{Ca},3-5n)$, respectively. Before implantation into the focal plane detector, the separated ERs passed through a time-of-flight (TOF) measuring system that consists of two (start and stop) multiwire proportional chambers filled with pentane at ≈ 1.6 Torr [2]. The TOF system allows to distinguishing recoils coming from the separator and passing through the TOF system from signals, arising from α decay or SF of the implanted nuclei (without TOF or $\Delta E1$ or $\Delta E2$ signals). In order to eliminate the background from the fast light charged particles (protons, α 's, etc produced from direct reactions of projectiles with the DFFRS media) with signal amplitudes lower than registration threshold of the TOF detector, a "VETO" silicon detector is placed behind the front detector. From the theoretical calculations and the available experimental data, one can estimate the expected α -particle energies of the ERs and their descendant nuclei that could be produced in a specific heavy-ion induced reaction of synthesis. For α particles emitted by the parent or daughter nuclei, it is possible to chose wide enough energy and time gates $\Delta E_{\alpha 1}$, $\Delta t_{\alpha 1}$, $\Delta E_{\alpha 2}$, $\Delta t_{\alpha 2}$ etc. and to employ a specific low-background detection scheme – method of "active correlations".

3. Method of "active correlations"

The simple, but very effective idea of the mentioned method is as following. PC-based Builder C++ program is aimed at searching in real-time mode of time-energy-position recoil-alpha links, using the two matrix representation of the DSSSD detector separately for ER matrix and α -matrix. In each case of "alpha particle" signal detection, a comparison with "recoil (ER)" matrix is made. If the elapsed time difference between "recoil" and "alpha particle" within preset time value, the system turns on the cyclotron beam chopper which deflects the heavy ion beam in the injection line of the U-400 FLNR cyclotron for a definite time interval (usually 0.5-2 min). The next step of the computer code ignores horizontal position (128 strips from p-n junction side) of the forthcoming alpha-particle signal during the beam-off interval. If such decay taken place in the same vertical position strip (48 strips) that generated the pause, the duration of the beam-off interval is prolonged by a factor 5-10. The dead time of the system, associated with interrupting the beam is about 110 μs , including linear growth chopper operation delay (~ 10 μs) and estimated heavy ion orbit life-time (~ 60 μs). In contrast to former resistive layer PIPS detector application [3,4], using of DSSSD detector one has three main specific features:

1. ER matrix (48x128 elements) de-facto already exists due to discrete composition of the DSSSD detector;
2. On the other hand, edge effects between the neighbor p-n junction side strips should be taken into account (128 strips in our case);
3. From the viewpoint of radiation durability off DSSSD it should be mentioned that detector is operated strongly in total depletion mode.

New version of software, reported below, takes into account points 1 and 2.

GNS-2016 Builder C++ program package

GNS-2016 Builder C++ program package has been designed to work together with new DSSSD based detection module of the DGFRS and appropriate electronics. It consists of two main parts:

- ERAS-2016.exe – data taker and file writer also used to generate beam stop signal;
- MONITOR-2016.exe – a visualization unit also used for exact tuning of TOF- $\Delta E_{1,2}$ low pressure, pentane filled module;
- Some programs used for testing electronics modules are also within this package.

ERAS – 2016 Builder C++ data taking program

ERAS-2016 C++ program (ER –Alpha Sequences) is designed to provide data taking, file writing and to search for ER- α correlated sequences in a real-time mode. The block-diagram of this process and the flow chart of the program are shown in the Fig.2 a,b, respectively. Note, that beam is chopped in the cyclotron injection line, when the value of ^{48}Ca projectile energy is small enough

(^{48}Ca beam energy is ~ 18 kV at the position of the beam chopper). The code branch, that is responsible for real-time search for ER- α sequence is shown in gray in Fig.2b.

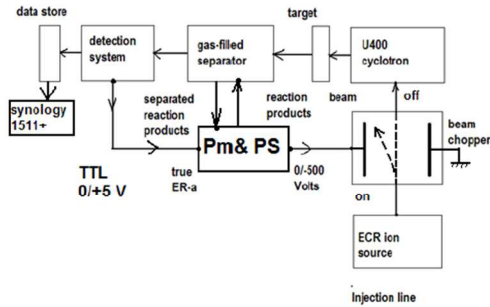


Figure 2a. Block-diagram of the process to search for ER-alpha chains and to provide beam stops. (Pm& PS – parameter monitoring and protection system of the DGFRS)

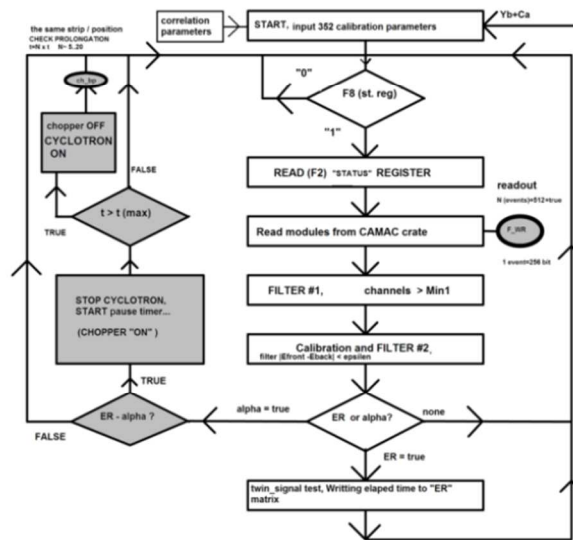


Figure 2b. The flow chart of the ERAS C++ program. Branch for searching for ER-alpha sequences is shown in gray in the left picture side. Calibration parameters are extracted from $^{nat}\text{Yb}+^{48}\text{Ca} \rightarrow \text{Th}^*$ nuclear reaction (352 constants)

ERAS correlation parameter list is represented below:

- ER- α correlation time to provide a beam stop;
- Integer value (5-20) which denotes that in the case of prolongation a beam-off interval, the pause will be a factor 5 to 20 longer;
- Minimum and maximum values of ER and α -particle signals set to stop the beam and min and max value of alpha particle signal set for prolongation of beam-off interval;
- Minimum and maximum values of TOF and $\Delta E_{1,2}$ signals measured with low pressure gaseous TOF module.

Routines “Filter#1” and “Filter#2” shown in Fig.2b provide filtering of incoming signals according to channel number and energy, respectively. The routine “check prolongation” is active only when the beam chopper is in “switch on” state, otherwise it provides no extra operation. Distinguishing between true/false Boolean “twin signal” variable is performed by reading of the appropriate eight bits of “status” CAMAC IM register unit. Each bit in “1” state corresponds to operation of 16-input analog-to-digital converters (ADC). Additionally, ERAS program generates text file with parameters of every beam stop. It includes energy signals of recoil and alpha particle from both

front and back strip of the DSSSD, elapsed time of the ER signal and time difference between alpha particle signal and ER (recoil) signal, numbers of and one bit marker (0/1) indicating simultaneous operation of two neighboring strips on p-n junction side. In $^{251,249}\text{Cf}+^{48}\text{Ca}$ reaction experiment at beam intensity $\sim 0.7 \mu\text{A}$, such “double” events from DSSSD back side strips amounted to $\sim 15.9\%$ of total number. In this case, the program calculates actual back strip energy in the form:

$$E_{\text{back}} = a_i N_i + b_i + a_{i+/-1} N_{i+/-1} + b_{i+/-1}. \text{ Here, } (a_i, b_i)\text{-calibration constants, } i=1..128.$$

4. MONITOR-2016 C++ code for file processing

C++ Builder MONITOR-2016 program is designed for processing of files generated by ERAS program. The program constructs spectra for each front and back strip and for ΔE and TOF signals (totally, 250 histograms). Except for building histograms, some specific spectra are built by the program. For example, it provides output files constructed as sum alpha spectra meeting a condition:

- a) all signals TOF=0 and $\Delta E_{1,2}=0$;
- b) the same as a) condition, but additionally, single-bit flight marker is equal to zero.

This flight marker is generated if at least one signal from start or stop gaseous counter exceeds a 40-mV threshold of an one-shot unit; in this case, the latter generates 0/+5 V output TTL signal with duration about 20 μs (preamplifier response to typical ER signal is $\sim 0.5\text{-}1$ V and about ~ 50 mV for 5.5 MeV alpha particles). Of course, with low-threshold one-shot unit, certain precautions must be made in order to avoid extra suppression of true α -particle signals of implanted nuclei decays.

5. Example of application of ERAS code in the $^{240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca} \rightarrow \text{Fl}^*$ complete fusion nuclear reaction

In the long term $^{240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca} \rightarrow \text{Fl}^*$ experiment the beam was interrupted after the detection of recoil signal with the expected implantation energy for $Z=114$ evaporation residues followed by an α -like signal in the front detector with the energy 9.8 – 11.5 MeV, in the same (or neighbor) DSSSD pixel. The ER energy interval was chosen to be 6 – 16 MeV. The triggering ER- α time interval was set to 1 s. The beam off interval was set 1 min. In this time, if an α -particle with E_α 8.5 to 11.5 MeV was registered in the same front strip as the ER signal, the beam off interval was automatically extended to 5 min. During the experiment, two chains were detected that were attributed to $Z=114$ nuclei [5]. These are presented in the Fig.3. The registered ER energy amplitudes are shown in the Fig.4 and are in a good agreement with the theoretical calculation [6].

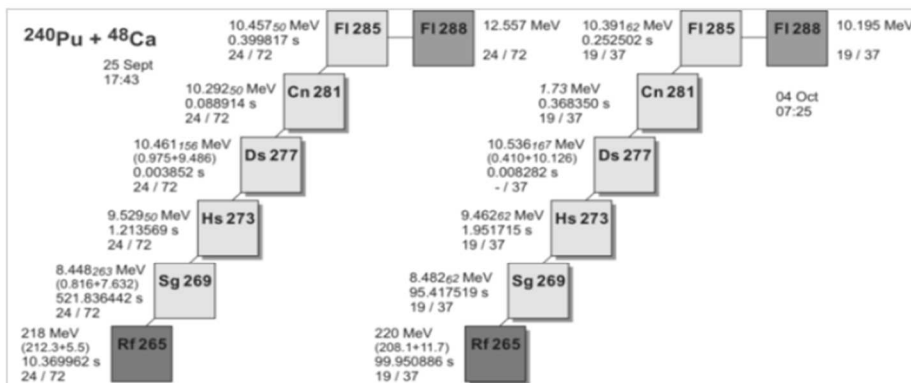


Figure 3. Two chains of $Z=114$ nuclei decay detected in the $^{240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$ experiment

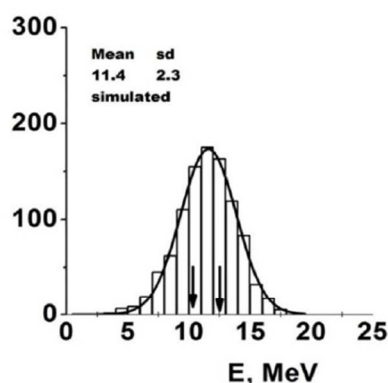


Figure 4. Two ER registered energy events of Z=114 nuclei detected in the $^{240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$ reaction. Left upper corner – results of Gaussian fit of computer simulation

6. Nearest future experiments

In a nearest future experiment we plan to apply new spectrometer version based on:

- New ADP-16 CAMAC 16 in universal module, which combines properties of both shaping amplifier, analog multiplexer and 16 in ADC for two scales (alpha particles and fission fragments). It manufactured by “TekhInvest” of free economy zone “Dubna. Except for three single ADCs PA-25 to measure TOF, ΔE_1 and ΔE_2 signals in the present spectrometer, we shall use single 1M CAMAC unit PA-3n-TOF. Note, that ADP-16 unit has eight cells of internal memory with time stamp. So, the sequence of 2.5-2.5-2.5-2.5-2.5-2.5-2.5-2.5 μS will be detectable in fact, although the regular dead time per event will be estimated about $\sim 20 \mu\text{S}$.
- To detect back side strip signals, and, therefore, horizontal position, we plan to use four CAMAC units and one additional input register unit [8].
- It is planned to apply a more exhaustive algorithms to suppress background products, except for ER- α chains real time mode detection. May be, ER- α - α sequence detection as a trigger to make a beam stop pause.
- First tests of the described system prototype were successfully performed in 2017 year using external 5.5 MeV alpha particle source.

7. Acknowledgments

This paper is supported in part by the RFBR grant No. 16-52-55002 and Czech Republic Grant No.259/6 for JINR 03-5-1130-2017/2021

8 Conclusions

Together with the higher granularity advantage, using of DSSSD detector arises some local problems, the edge effect between neighbor strips on p-n junction side being one of them. With Borland’s Builder C++ GNS-2016 program package this problem was solved. The “active correlations” method was successfully applied in the $^{240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca} \rightarrow \text{Fl}^*$ experiment using DSSSD based spectrometer of the DGFRS. Measured by the DGFRS DSSSD detector, average ER’s energy is in a good agreement with the value calculated one.

For our future projects, associated with putting into operation in 2018 of a new DC-280 ultra intense FLNR cyclotron, we plan to develop more sophisticated algorithms for searching for recoil-alpha or even recoil-alpha-alpha sequences in a real-time mode.

New version of nearest future experiment spectrometer prototype based on ADP-16 and Pa-3n-TOF unit to measure TOF- ΔE_1 - ΔE_2 signals to provide more effective background suppression using real-time mode is successfully tested.

8. Appendix A

Nuclear reaction ${}^{\text{nat}}\text{Yb}+{}^{48}\text{Ca}\rightarrow{}^{217}\text{Th}+3\text{n}$ is very useful for calibration procedure due to a relatively short live time of this thorium isotope. Therefore it is easy to extract ER-alpha correlated chains from the whole data flow. Additionally, this test reaction one can use to study upper described edge effect between two neighbor strips. In the Fig.5 two dimensional picture $E_2 = F(E_1)$ is shown. Here $E_{1,2}$ – energies for any first and second strip, respectively. It can be easily seen that the sum of E_1+E_2 is close enough to the alpha decay energy of ${}^{217}\text{Th}$ isotope. In the Fig.6a the spectrum for one signal (from two) is presented. To a first approximation, small decreasing in the spectrum middle can be interpreted as a ballistic deficit

In the case of charge collection process in the inter strip area (100 μm) takes place. In the Fig.6b,c ${}^{217}\text{Th}$ recoil registered energy spectrum is shown. In the Fig.7 dependence of back strip measured alpha decay energy against the one measured with front strips is shown.

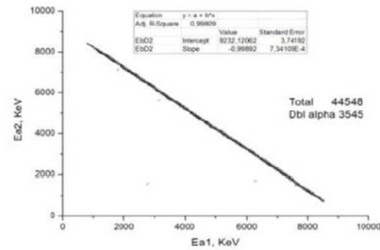


Figure 5. Two dimensional histogram for the case of two signal detection (neighbor strips). Reaction ${}^{\text{nat}}\text{Yb}+{}^{48}\text{Ca}\rightarrow{}^{217}\text{Th}+3\text{n}$

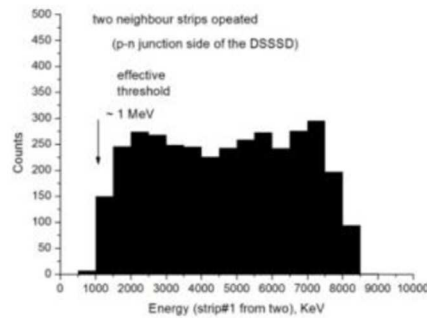


Figure 6a. Spectrum of one (from two) ${}^{217}\text{Th}$ alpha decay signal

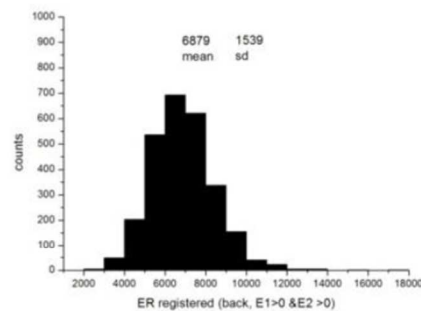


Figure 6b. ER's ${}^{217}\text{Th}$ registered energy spectrum. Both values $E_1 > 0$ and $E_2 > 0$

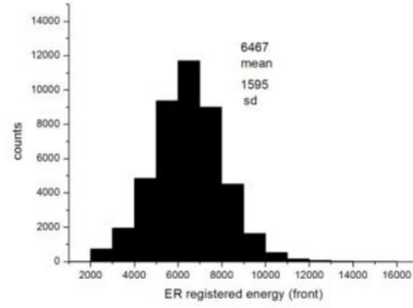


Figure 6c. The same as b), but for all recoils ^{217}Th

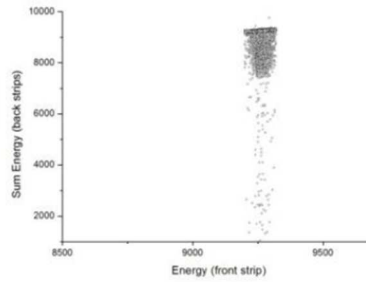


Figure 7. The dependence of sum energy (p-n junction side) against the one measured with front strips

9. Appendix B

Below, schematics of the simplified equivalent circuit charge collection is presented (see Fig.8.) It explains effect of charge division ballistic effect observed in $^{nat}\text{Yb} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{217}\text{Th} + 3n$ nuclear reaction as it was shown in the Fig.'s 5, 6a.

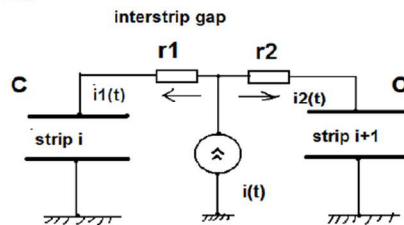


Figure 8. Inter strip charge collection equivalent circuit schematics

In this case the equation system for charge division process will be as following:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

$$\frac{Q_1(t)}{C} + i_1(t) \cdot r_1 = \frac{Q_2(t)}{C} + i_2(t) \cdot r_2$$

$$i_1(t) = Q_1'(t)$$

$$i_2(t) = Q_2'(t)$$

With the conditions:

$$Q_1(T_p) + Q_2(T_p) = Q_0$$

and : $i(t) = F(t)$, $0 < t < T_p$, where T_p is plasma time value, $Q_{1,2}$ - charge values collected for neighbor strip circuits[9,10]. Here Q_0 is a summing charge value.

References

- [1] K.Subotic, Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, Yu.S.Tsyganov and O.V.Ivanov "Evaporation residue collection efficiencies and position spectra of the Dubna gas-filled recoil separator," Nucl. Instrum. And Meth. In Phys. Res. A481, pp.71-80, 2002.
- [2] Yu.S.Tsyganov, V.G.Subbotin, A.N.Polyakov, A.M.Sukhov, S.Iliev, A.N.Mezentsev, D.V.Vacatov "Focal plane detector of the Dubna gas-filled recoil separator", Nucl. Instrum. And Meth. In Phys. Res. A392, pp.197-201, 1997..
- [3] Yu.S.Tsyganov, "Automation of Experiments at Dubna Gas-Filled Recoil Separator," Phys. of Part. and Nuclei, vol.47, No.1, pp.73-107, 2016.
- [4] Yu.S.Tsyganov, "Synthesis of new superheavy elements using the Dubna gas-filled separator: the complex of technologies," Phys. of Part. and Nuclei, vol.45, No.5, pp.817-847, 2014.
- [5] V.K.Utyonkov, N.T.Brewer, Yu.Ts.Oganessian, K.P.Rykaczewski, F.Sh.Abdullin, S.N.Dmitriev, R.K.Grzywacz, M.G.Itkis, K.Miernik, A.N.Polyakov, J.B.Roberto, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, M.V.Shumeiko, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.V.Sabelnikov, G.K.Vostokin, J.H.Hamilton, M.A.Stoyer, S.Y.Strauss, "Experiments on the synthesis of superheavy nuclei ^{284}Fl and ^{285}Fl in the $^{239,240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$ reactions," Phys. Rev. C92, 034609, 2015.
- [6] Yu.S.Tsyganov and A.N.Polyakov "Computing at the Dubna gas-filled recoil separator," Nucl. Instrum. And Meth. In Phys. Res., A558, pp.329-332, 2006.
- [7] A.N.Kuznetsov ADP-16 "TekhInvest" manual. Free economy zone "Dubna"
- [8] L.Schlattauer, A.Voinov et al. // This volume
- [9] W.Seibt, K.E.Sundström and P.A.Tove "Charge collection in silicon detectors for strongly ionizing particles". Nucl. Instrum. And Meth 113 (1973)317-324
- [10] Yu.S.Tsyganov Report at MMCP'2017 Int. Conference. JINR, Dubna. July 2017.

Příloha E Spoluautorská publikace: DEVELOPMENT OF THE AUTOCALIBRATION SYSTEM FOR THE DGFRS SPECTROMETER BASED ON THE DOUBLE-SIDED SILICON STRIP DETECTORS

DEVELOPMENT OF THE AUTOCALIBRATION SYSTEM FOR THE DGFRS SPECTROMETER BASED ON THE DOUBLE-SIDED SILICON STRIP DETECTORS

V.G. Subbotin¹, A.M. Zubareva¹, L. Schlattauer^{1,2} and A.A. Voinov^{1,a}

¹ *Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie, Dubna, Moscow region, 141980, Russia*

² *Department of Experimental Physics, Faculty of Science, Palacký University, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic*

E-mail: ^a voinov@jinr.ru

The detection system of the Dubna gas-filled recoil separator (DGFRS) aimed at the studying of the SHE nuclei and their decay properties has been modernized during last few years. The new set of multi-strips double-sided silicon detectors (DSSD) in focal plane of DGFRS is applied now instead of the old array of 12-strips position-sensitive Si detectors. The total amount of measuring spectroscopic channels of the registering system has increased also up to 224 channels. It leads to more precise measuring of the energy and coordinate of the implanted nuclei of the SHE into the focal detectors and of their decay products. It is important to test multi-channel registering system and perform energy calibration before carrying out of such unique experiments on the synthesis of new nuclei from the “Island of stability”. This work is devoted to describe the designed method and produced specific digital module which allows performing an energy calibration for the all 224 individual spectroscopic channels independently. This device provides automatic bypassing of the all individual channels one after another imitating charge particles incoming to the each strip of detector array. Energy of the imitating signal can be chosen from the range of 1 MeV up to 150 MeV with high amplitude linearity and temperature stability.

Keywords: DGFRS, DSSD, registering system, energy calibration, nuclear electronics, multiplexer, encoder, operational amplifier

© 2017 Vladimir G. Subbotin, Alla M. Zubareva, Leo Schlattauer, Alexey A. Voinov

1. Introduction

More than 50 new isotopes of the nuclei with $Z = 104-118$ from the predicted “Island of stability” of superheavy elements (SHE) were synthesized for the first time at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR, Dubna) using Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) and heavy ions cyclotron U-400 during last 15 years [1]. Due to this research the Periodic Table of Elements was recently filled with six new elements $Z=113$ (Nh), 114 (Fl), 115 (Mc), 116 (Lv), 117 (Ts) and 118 (Og).

During these pioneering experiments in FLNR the appropriate detector module had being used at the DGFRS focal plane which consisted of the array of twelve position-sensitive Si detectors surrounded by six side Si detectors (Canberra NV) and of the time-of-flight module (two multi-wire proportional chambers fulfilled with pentane gas at low pressure about 1 Torr). More detailed descriptions can be found in our previous papers and references therein [2-4].

Recently, the focal-plane detector array has been modified to increase the position resolution of recorded signals and subsequently reduce the probability of observing sequences of random events that mimic decay chains of implanted nuclei. The new detector assemblage consists of 300 μm thickness double-sided Si strip detector (DSSD) with 48 mm by 128 mm active area in focal plane and surrounded by 500 μm six single-sided Si detectors 65 mm by 120 mm each (Micron Semiconductor Ltd.). Focal-plane DSSD has 1-mm wide strips, 48 at the front side and 128 at the back side, creating over 6000 individual $1 \times 1 \text{ mm}^2$ pixels in one Si wafer. Such high pixelization helps to achieve superior position resolution for recoil-correlated decay sequences reducing potential random events. This new Si-detector array was designed, assembled, commissioned off-line and provided by ORNL. The signals from all detectors were processed using MESYTEC linear preamplifiers [5]. Further, these analog signals were split into two independent measurement branches by special spectroscopic splitter-amplifier PA32-64 [6] designed by the DGFRS group. Thus, all detectors' signals were processed simultaneously by “analog” electronics (TekhInvest Ltd., Dubna) similar to those used in previous DGFRS experiments [1], and by digital electronics system based on XIA Pixie-16 modules [7].

This new DSSD assembly and two new independent registering systems were successfully applied recently in ^{239}Pu , $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ experiments [8] and $^{249-251}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$ experiment [9] aimed at the synthesis and the study of the properties of the new $^{283-285}\text{Fl}$ and $^{295,296}\text{Og}$ isotopes. The FWHM energy resolution of the implantation detector was 34 to 78 keV depending on the strip, while the summed signals recorded by the side and implantation detectors had an energy resolution of 147 to 263 keV. For getting better energy resolution for side detectors we plan to order new design with eight strips for every side detector, thus it will cause increasing of the total number of the spectroscopic channels by 48 ones in comparison with used present detectors design [8].

The detectors and registering systems should be calibrated prior to start every experiment, moreover before every finish of the experiment and sometimes during the experiments also. For this purpose we perform two reactions, $^{nat}\text{Yb}(^{48}\text{Ca}, 3-5\text{n})^{215-220}\text{Th}$ to calibrate α -range scale and $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2\text{n})^{252}\text{No}$ – to SF range scale, as it was described in [4]. There are no problem to calibrate individual PIXIE-16 channel in digital measuring system (based on the DSP and FPGA, see [7]); every PIXIE-16 channel is working independently. In “analog” system (CAMAC based, TekhInvest Ltd.) every measuring ADC works in combination with 16-input analog multiplexer for each of 16 strips; only first signal in time from every 16 strips will be processed by corresponding ADC.

Besides of nuclear reactions, for the linearity test of the scales we can calibrate our systems by means of spectroscopic pulser module (for example, ORTEC 419) with precise stable preset amplitudes [10] imitating income of α -particles and SF events to surface of the Si detectors.

2. 16-channel charge-sensitive preamplifier

Choosing of MPR-64 from Mesytec [5] as multi-channel charge-sensitive preamplifier with high resolution, linearity in the energy range of signals up to 300 MeV and with long-term stability are satisfying our needs during the experiments at the DGFRS. There is just one disadvantage of

using these devices together with “analog” measuring branch. Preamplifier MPR-64 has 64 individual channels performed as four separate PCBs containing 16 channels each. There is also separate Pulser Input for each PCBs, thus signals from outer pulser can go just simultaneously to all 16 channels of one PCB. So, due to this feature of MPR-64 there is no possibility to perform the energy calibration for the individual channel in “analog” registering system based on ADP-16 (TekhInvest Ltd.) which has on-board SAR ADC working in combination with 16-input multiplexer with priority encoder. To bypass this inconvenience in calibration of the individual channel in the “analog” branch we designed new multi-channel charge-sensitive PA-16 preamplifier (Figure 1), which was recently tested and presented during the symposium NEC’2015 [6].

The main characteristics are presented below and in Table 1:

- ✓ Input/Output polarity - Inverted
- ✓ Energy sensitivity (Si) - 8 mV/MeV
- ✓ Noise output performance - See Table 1
- ✓ Negative feedback constant - 10MΩ/5.6 pF
- ✓ Power supply +6V 200 mA
-6V 110 mA

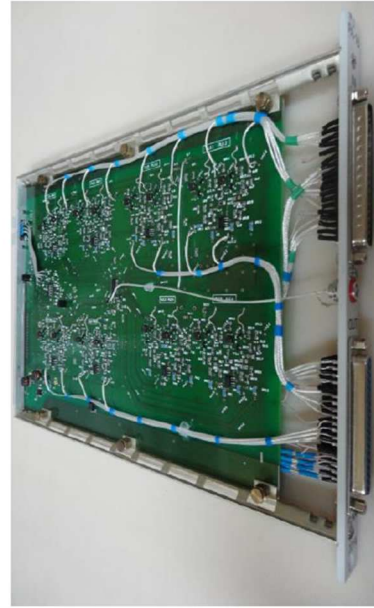


Figure 1. The front panel and PCB view of 16-channel charge-sensitive PA-16 preamplifier [6]

For calibration of the individual channels with external pulse generator, the CMOS low-voltage 16-channel ADG706 multiplexer [11] was applied operating in de-multiplexing mode. It switches the input pulse from the precision spectroscopic pulser to one of the 16 outputs with a number chosen by address code preset by special control BOKAL module.

To process signals from the whole detector module (48 ‘front’ strips and 128 ‘back’ strips of DSSD; and 48 ‘side’ strips) we need 14 preamplifier PA-16 modules. They are realized as 1M CAMAC modules, and have LEMO input for pulser and two DB-37 connectors for 16 input signals from detectors and 16 – output, correspondently. At the back of the PCB of every PA-16 module there are 4 pins going to CAMAC bus for

Table 1. Noise performance measured for PA-16 using the ORTEC 575A spectroscopy amplifier set at 1.5 μs, near-Gaussian shaping

C_{source} , pF	Noise, keV, FWHM, Si	Rise time, nanoseconds
0	5	26
70	10,5	30
132	14	40
175	16	60
225	17,5	90

controlling the number of certain spectroscopic channel in the preamplifier by BOKAL module providing binary code “1 of 16” through CAMAC bus to the each preamplifier in the crate. The characteristics of the spectroscopic pulses from PA-16 are presented in Figure 2.

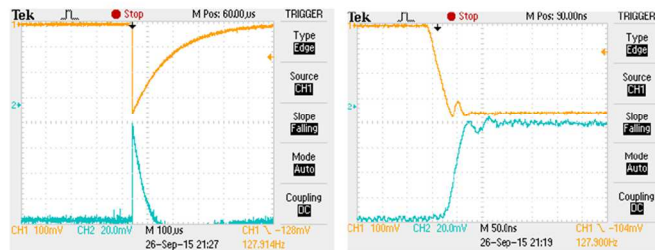


Figure 2. The shapes of the input signal from precise CF-219 [12] pulser (in orange) and output signal after PA-16 (in bleu) are shown

3. Controller for spreading out and counting of the pulses

New mixed analog-digital Block for Organization of CALibration (BOKAL) was design to perform testing and energy calibration “off-line” of the individual measuring channels of the DGFRS registering system. Impulses of certain amplitudes (corresponding to the energies of 6, 12, 70 and 140 MeV) from precise spectroscopic CT-219 generator [12] calibrated by α -source comes to the input “Тек” of the module and then are shared into three groups of outputs (128 ПИV (yellow LEMO) connectors for rear DSSD strips, 48 ПИV ФОК (red) for front strips and 48 ПИV БОК (blue) for side strips). Every connector goes to Pulser input of the preamplifier PA-16 serving corresponding front, rear and side strips of the detector array. BOKAL module allows calibrate measuring channels both automatically with pre-defined energy amplitude of the pulser or in manual mode. In auto-mode pulses start from pressing button “ПУСК” and will stop after BOKAL will count 1024 (or 2048/4096 – optionally) events for every channel. The calibration procedure can be stopped also manually by “СТОП” button. In manual mode user should choose needed block of preamplifiers by button “+1 № блока” and needed channel by button “+1 № ПИV”. The start will be after push the button “ПУСК ГЕК” and will finish after push “СТОП”. The counting and numbers of the chosen block and preamplifier channel can be reset by button “СБРОС”. The blue LED lamps indicate current block in binary code, and green lamps indicate current channel. After reset the counting will begin from the first module and the first channel (with the lamps off). The output signals from BOKAL are shown in Figure 4.



Figure 3. Front view of the module BOKAL (Block for the Organizing of the CALibration)

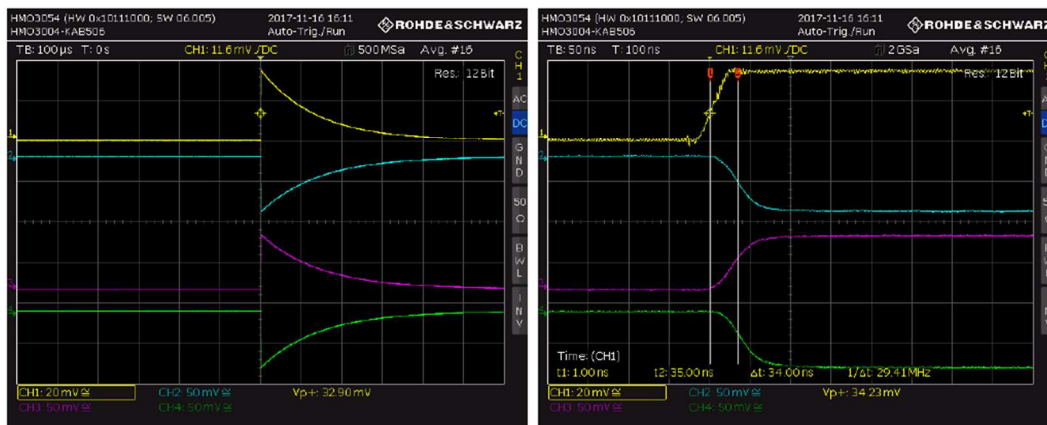


Figure 4. The input CT-219 [12] pulser signal and output signals going to corresponding PA-16 (front, rear and side) are shown in yellow (1), in blue (2), magenta (3) and green (4)

The propagation delay of the input signal for BOKAL is 34 ns. The module can process the spectroscopic signals with rise time starting from 10 ns. The upper speed limit for coming pulses is 100 kHz. The transmission coefficient equals to 1. The output polarity of the signals (for front, rear and side preamplifiers) can be set by user on-board. The requested power is +6V/-6V and 180mA/100mA. The device can be performed both as CAMAC-standard module or NIM-standard.

4. Conclusion

The unique system for the calibration of the registering system based on the multi-strip double-sided silicon detectors has been designed and realized by our research team. It allows imitate incoming of the charge particle to the surface of the DSSD. User can choose appropriate energy from 1 MeV up to 150 MeV with pulser preset. To achieve such functionality we designed 16-channel spectroscopic charge-sensitive preamplifier and specific logical module (BOKAL) which provides automatic energy calibration of every channel of the multi-channel measuring system using globally controlled sequential distribution of spectroscopic pulses. This allows perform calibration both in manual “channel by channel” mode or in auto mode. The auto mode is important time saver before every experiment in comparison with using manual calibration by connecting the pulser to each channel by cable manually. Presented part of the spectrometer also minimizes the human errors during the calibration process.


5. Acknowledgement

The current work was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research by grants No. 13-02-12052 and No. 16-52-55002; and by Moscow Region Government through Grant No. 736/36-16.09.2014. Also, this work was partially supported by the internal student grant IGA of Palacký University in Olomouc, Czech Republic, No. IGA_PrF_2015_017.

References

- [1] Oganessian Yu.Ts. and Utyonkov V.K. Super-heavy element research. // Rep. Prog. Phys. 78, 036301 (2015).
- [2] Tsyganov Yu.S. et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 525, (2004), pp. 213-216.
- [3] Tsyganov Yu S, A. N. Polyakov, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 513 (2003) 413; A 558 (2006) 329-332; A 573 (2007) 161.
- [4] Voinov A.A. et al., Calibration of the silicon position-sensitive detectors using the implanted reaction products, in *Proceedings of the XXIII International Symposium on Nuclear Electronics and Computing “NEC’2011”*, Varna, Bulgaria, 2011, pp.286-291.
- [5] Rajabali M.M. et al. // Phys. Rev. C 85, 034326 (2012); Mesytec GmbH & Co. KG, Multichannel Logarithmic Preamplifier; <http://www.mesytec.com>.
- [6] Subbotin V.G. et al. New analog electronics for the new challenges in synthesis of superheavy elements // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, ISSN 1547-4771, eISSN: 1531-8567, 2016, vol. 13, No. 5, pp. 557–560.
- [7] Grzywacz R. et al., Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect B 261, 1103 (2007); <http://www.xia.com>.
- [8] Utyonkov V. K. et al. Experiments on the synthesis of super-heavy nuclei ^{284}Fl and ^{285}Fl in the $^{239,240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reactions // *Physical Review C* 92, 034609, 2015.
- [9] Voinov A.A. et al. Results from the recent study of the $^{249-251}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$ reactions, in *Proceedings of the International Symposium on “Exotic Nuclei EXON-2016”*, ISBN 978-981-3226-53-1, Kazan, Russia, 2016, pp. 219-223.
- [10] www.ortec-online.com.
- [11] www.analog.com
- [12] Subbotin V.G., Iliev S.N., Voinov A.A., JINR Report P13-2004-97, Dubna, 2004.

Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW-based digital system

Leo Schlattauer^{1,2}, Levent Parali³, Jiri Pechousek¹ ,
Israfil Sabikoglu⁴, Cuneyt Celiktas⁵, Gozde Tektas⁵,
Petr Novak¹, Ales Jancar⁶ and Vit Prochazka¹

¹ Department of Experimental Physics, Faculty of Science, Palacký University, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc, Czech Republic

² Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow region, Russia

³ Departments of Electronics and Automation, Celal Bayar University, 45400 Turgutlu, Manisa, Turkey

⁴ Department of Physics, Faculty of Arts and Sciences, Celal Bayar University, 45140 Muradiye, Manisa, Turkey

⁵ Department of Physics, Faculty of Science, Ege University, Bornova, Izmir, Turkey

⁶ VF, a.s., Svitavska 588, 679 21 Cerna Hora, Czech Republic

E-mail: jiri.pechousek@upol.cz

Received 30 December 2016, revised 29 May 2017

Accepted for publication 20 June 2017

Published 17 August 2017



CrossMark

Abstract

This paper reports on the development of a gamma-ray spectroscopic system for the (i) recording and (ii) processing of spectra. The utilized data read-out unit consists of a PCI digital oscilloscope, personal computer and LabVIEW™ programming environment. A pulse-height spectra of various sources were recorded with two NaI(Tl) detectors and analyzed, demonstrating the proper usage of the detectors. A multichannel analyzer implements the Gaussian photopeak fitting. The presented method provides results which are in compliance to the ones taken from commercial spectroscopy systems. Each individual hardware or software unit can be further utilized in different spectrometric user-systems. An application of the developed system for research and teaching purposes regarding the design of digital spectrometric systems has been successfully tested at the laboratories of the Department of Experimental Physics.

Keywords: gamma ray, Gaussian, LabVIEW, multichannel analysis

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

Introduction

Calibration of gamma-ray detectors plays a key role in a wide range of nuclear spectroscopy. The main improvement of different methods used in this field [1, 2] brought a replacement of analog measurement systems by digital ones [3–7]. A lot of studies have reported various spectrometric digital systems and processing software development [8–16].

Digital signal processing (DSP) directly performs the spectrometric calculations on the experimental data and can be implemented in both hardware and software. Here the small deviations in calculations as simple round-off errors could not be dismissed, and the result numbers should match at least 7 significant figures [2].

Each developed system implements one or more spectrometric methods. Mariscotti (1967) published a basic method for automatic identification of peaks in the presence of background [17] and other similar examinations were reported [18–23]. For instance, Teoh (1973) and Routti and Prussin (1969) presented overlapped peak fitting methods [22, 24]. Koskelo (1987) discussed the application of various types of background correction functions [25]. Zhang *et al* (2008) examined the small peak analysis near background level [26]. Quintana and Fernández (1998) published a continuous component determination in gamma-ray spectra [27, 28]. Koskelo *et al* (2001) performed coincidence summing corrections [29] and Gavron (1969) spectrometric system dead time corrections [30].

Concerning gamma-ray registration, scintillation detectors are mostly used. For calibration purposes the usage of semiconductor detectors is also possible [31–39].

The aim of the presented paper is to demonstrate a validation of the newly implemented calibration concept with a well-known Gaussian fit in the developed LabVIEW™ application. Calculations are performed on a huge experimental data set recorded by the developed system. The calibration activities with gamma-ray scintillation detectors and the digital measurement system are based on the National Instruments PCI-5122 digitizer.

Experiment

The relevant gamma-ray energies E_γ emitted by the given radioactive sources appear as full photopeaks in the multichannel analyzer (MCA) spectra in accordance with the detector properties. Those energies are used for the MCA energy scale calibration, and hence the determination of gamma rays emitted from an unknown source is possible. Parameters such as the position of photopeaks, the energy resolution (full width at half of maximum, FWHM), and the number of counts (net area) in a photopeak are used for the calibration. The background spectrum is then used to correct the number of the counts in the main photopeaks by its subtraction in the same region of interest (ROI). The calibration curve of the gamma-ray detector is then derived from the photopeaks' positions. This curve could be fitted by a linear or upper order polynomial function. The calibration results depend on each subsystem (detector type, radioactive source, digital oscilloscope, software algorithms, control application, etc) in the system.

We have developed a gamma-ray spectrometry system based on the virtual instrumentation technique [40–45]. The presented system includes high-energy NaI(Tl) scintillation detectors (i) Tesla NKG 302 A and (ii) Tesla NKQ 322, two high voltage power supplies (C4720, Hamamatsu), and two amplification units integrated in the single channel analyzer (JKA 1102, TEMA). Signal shaping in both two-stage amplification units was optimized with

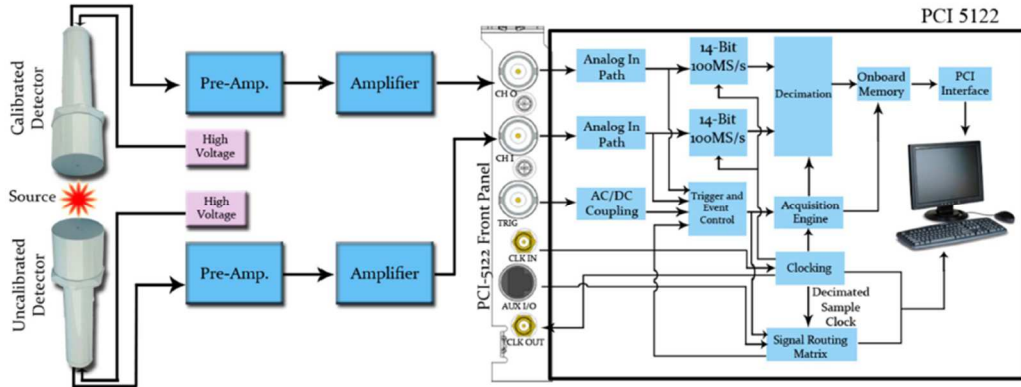


Figure 1. The block diagram of the gamma-ray spectroscopy system. The system is designed for simultaneous measurements on two detectors, based on an onboard digital signal processing, software data analysis, and data manipulation.

an integration constant of $1 \mu\text{s}$ and a gain of 10 for the first stage and of 5 for the second one. The high voltage was optimized individually for each detector to (i) 1006 V and (ii) 1117 V, respectively, for optimal observation of the simultaneously recorded spectra.

The data read-out with a DSP was performed by the PCI-5122 digitizer, personal computer and two dedicated software applications. Figure 1 shows the main block diagram of the system for solving the task. The uncalibrated detector is compared with a calibrated (reference) detector, the traceability of which is known.

The gamma rays emitted from the radiation source were detected simultaneously by two detectors. Analog signals from the detectors were digitized with a high resolution (14-bit) and a high sampling rate (up to 100 MS s^{-1}). Therefore the MCA spectra can be accumulated into 16 384 channels with precise time characterization of acquired pulses.

The first application operates as the pulse-height spectra recorder. It was developed for simultaneous data acquisition from two detectors. There all the relevant parameters for the acquisition were set with its repeatability for statistical calculations. As the first step of the DSP, the proper sampling rate and pulse processing parameters should be set (discussed in detail in [44]). The second main application works as the MCA for off-line spectra analyses.

In the measurement part of this study various source pulse-height spectra were recorded. Each measurement was repeated 20 times and evaluated by a Gaussian peak fitting method with the ROI set manually. Table 1 summarizes related sources and energies.

During the experiment both detectors and the source were aligned in-line (figure 1) and both distances (0–7 cm) were changed in the same way. The parameters, such as linearity of the energy scale, photopeak full width at half of maximum (FWHM), stability of the peak center position, detection efficiency, etc, can be analyzed. It should be noted that to record one spectrum at one distance and by changing the data accumulation time is not enough for the analysis of effects like overloading of the detectors (or whole spectrometric chain) by high activity sources. Generally an estimation of the influence of high activity sources on the properties of detectors should be performed accurately.

Results and discussion

For each source the acquisition time was selected individually from 30 to 2000 s to have high count statistics for calculations, taking into account the actual source activity. Figures 2 and 3

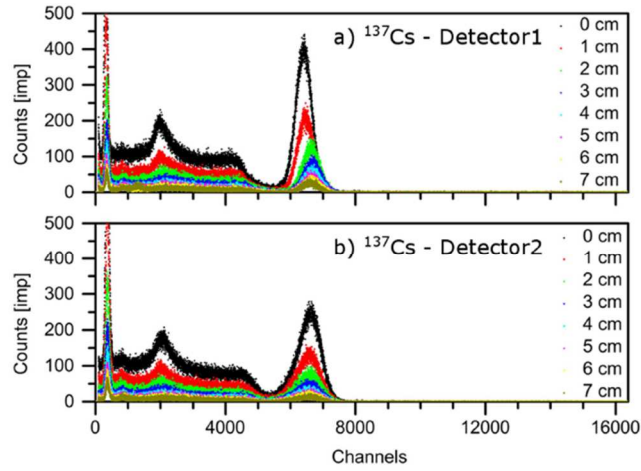


Figure 2. ^{137}Cs MCA spectra recorded for all distances from 0 to 7 cm between the source and the detectors.

Table 1. Radioactive sources of gamma rays used in the study.

	Energy [keV]	Radioactive Source
1	32.0 ^a	^{137}Cs
2	121.8	^{152}Eu
3	344.3	^{152}Eu
4	511.0	^{22}Na
5	661.7	^{137}Cs
6	1173.2	^{60}Co
7	1274.5	^{22}Na
8	1332.5	^{60}Co

^a 32.0 keV (x-ray) represents overlapped $K_{\alpha 1,2}$ lines of ^{137m}Ba ($E_{K_{\alpha 1}} = 31\,816, 615(60)$ eV, $E_{K_{\alpha 2}} = 32\,193, 262(70)$ eV). The NaI(Tl) detector is not able to resolve both energies, as only one dominant peak appears in the spectrum.

show selected recorded spectra for both detectors 1 and 2 (figure 2 shows ^{137}Cs , figure 3 shows ^{22}Na MCA spectrum, respectively). The main photopeaks were well resolved in accordance with table 1. The ROI values were selected manually. After photopeak background correction, the photopeaks were analyzed.

The photopeak background correction was performed automatically considering its linear behavior. The corrected data above the background line were further analyzed. Figure 4 demonstrates the linear background correction before Gaussian peak analysis.

The peaks were analyzed by a Gaussian function for peak fitting by a least square method built in LabVIEWTM. The outputs of this function include center of the Gaussian, area, amplitude, standard deviation and residua. The method uses the Levenberg–Marquardt algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters [46]. It fits data to a Gaussian curve given by a following equation (1):

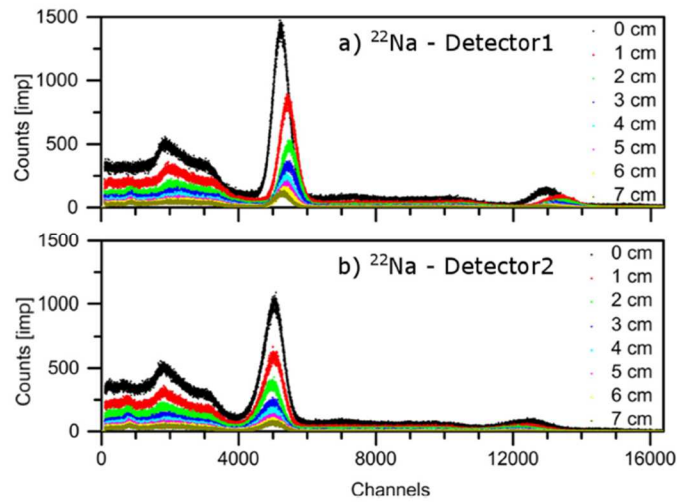


Figure 3. ^{22}Na MCA spectra recorded for all distances from 0 to 7 cm between the source and the detectors.

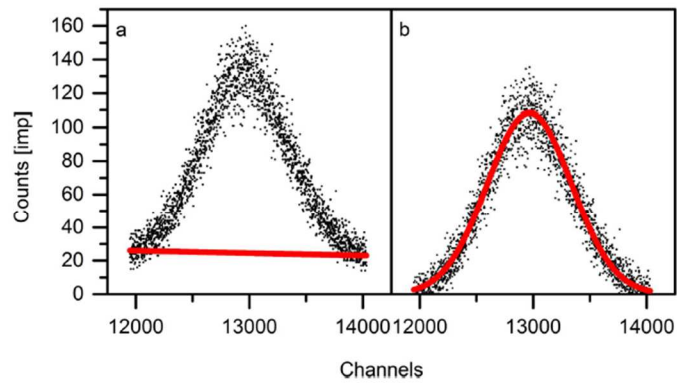


Figure 4. Gaussian peak fitting by least square method. The background level in the raw photopeak (a) is linearly corrected and processed by the algorithm (b).

$$f(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + c, \quad (1)$$

where a is amplitude, μ is center, σ is standard deviation, and c is offset. This LabVIEW function finds the values of a , μ , σ , and c that best fit the observations.

Our main task was the development of the MCA processing application. Figure 5 shows the front panel of this application. All calculations were performed as mentioned above. The results of the calculations are displayed directly on the front panel by activating a relevant window.

The integrated fitting algorithm uses a double-precision floating-point (DBL) number format without any loss of precision. The resulted values of calculations are displayed as numbers rounded-off according the physical meaning.

In this version of the MCA processing application, three types of results are presented at the end of processing for each source, photopeak, etc, as is shown in figure 5. The

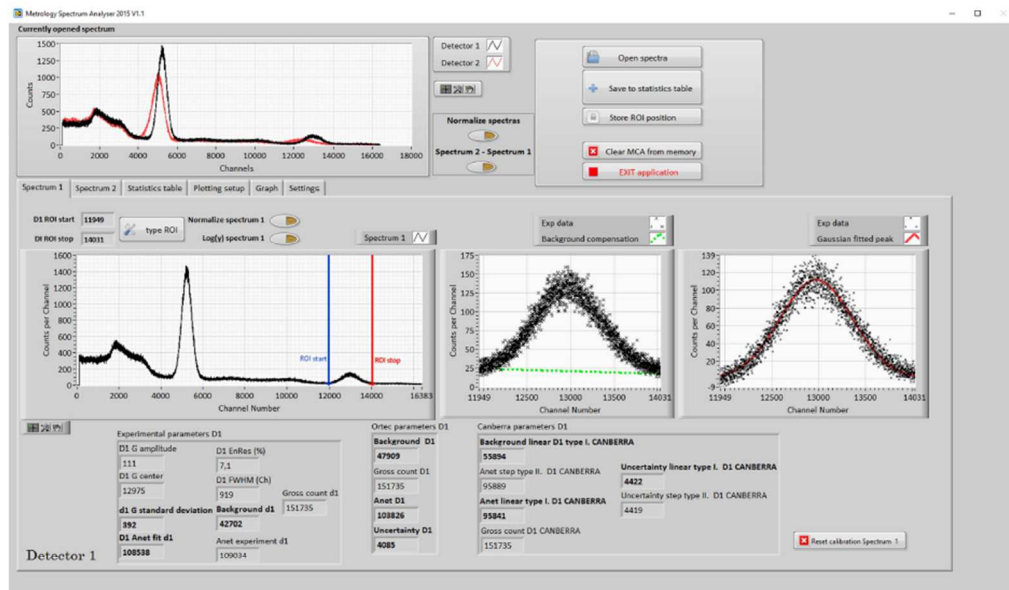


Figure 5. Front panel of the MCA processing application developed in LabVIEW. User can load all the spectra recorded by pulse-height spectra recorder, select ROIs, optimize calculations and observe the results.

experimental results (i) calculated by the developed algorithm are compared with the results taken from the data analysis applications for commercial gamma-ray spectroscopy systems (ii) MAESTRO[®] (ORTEC) [47] and (iii) ProSpect[®] (Canberra) [48], calculated on the same data. Algorithms described in manuals for the commercial systems were implemented into the developed application. This was done for comparison purposes only.

After photopeaks analysis, the least square method with linear and polynomial fit (the 2nd order) was used for detector energy calibration. This calibration resulted in average Gaussian center positions (x -axis, channels) displayed in accordance to energies (y -axis, keV). Calibration lines and equations were calculated for both detectors (D1, D2). The results were compared with the ones taken from MAESTRO[®] and ProSpect[®] calculations, as mentioned above.

The outputs of the Gaussian peak fitting function are acquired in the main application to generate final tables, graphs and files for calibration purposes. Off-line analysis allows optimizing all the calculations of a data set and carefully checking the relevance of the results. The resulted precision of each calculated parameter is given by the number of MCA spectra recorded for each configuration step (detector, source, energy, distance, etc); in this experimental study the number is up to 20 repetitions.

Figure 6 shows an example of the resulting graphs displaying the dependency of the calculated Gaussian peak centroid position (in channels) on the source-detector distance (from 0 to 7 cm). The evaluated photopeaks are (a) 32.0 keV, (b) 121.8 keV, (c) 344.3 keV, (d) 511.0 keV, (e) 661.7 keV, (f) 1274.5 keV.

From figure 6 we can evaluate the spectrometric quality of both detectors, and evaluate possible errors caused by the experiment setup and/or user. From the results one can estimate which detector (amplifier or other unit in the spectrometric system) is more likely to be overloaded (or saturated, respectively) by high activity sources. This can cause, for example, a decrease in the pulse amplitude at a given channel interval (ROI), or affect the linearity of

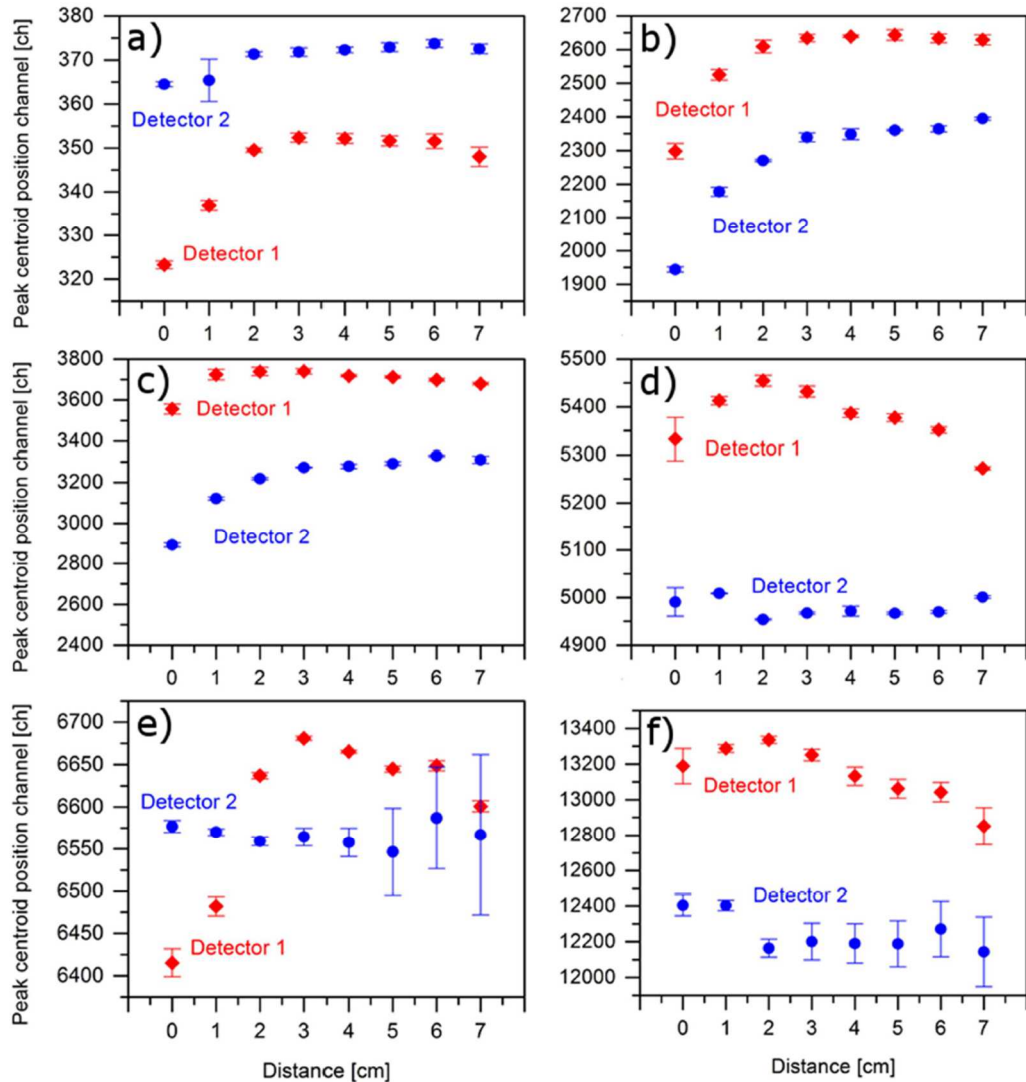


Figure 6. Comparison of two NaI(Tl) detectors over different loads induced by changing the distance between the radioactive source and the detector and calculated by our experimental method. Evaluated photopeaks are (a) 32 keV, (b) 121 keV, (c) 344 keV, (d) 511 keV, (e) 661 keV, (f) 1274 keV.

the energy scale, FWHM values and other parameters. It was also observed that Detector 2 is probably more sensitive for operation conditions, since larger errors were calculated. Mainly the influence of temperature fluctuation in the laboratory on the detectors characteristics is assumed.

For determination of the detector linearity and the energy to channel conversion, proper graphs were generated. Figure 7(a) shows the dependency of the nominal energy (in keV) on the MCA channel for all the energies used. In the same analysis, the dependence of FWHM energy resolution on nominal energy was obtained, see figure 7(b).

Further, from figure 7 we could evaluate the spectrometric quality of both detectors and their final low or high gamma-ray energy usability.

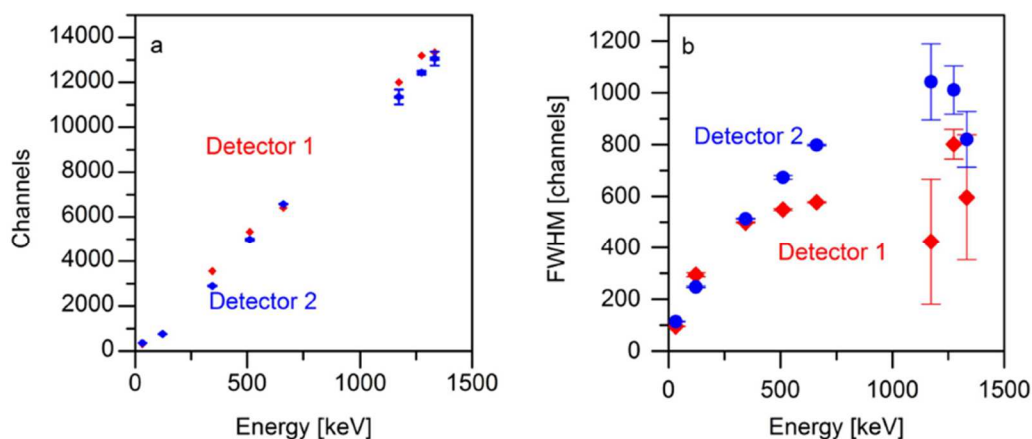


Figure 7. Comparison of two NaI(Tl) detectors for all sources and energies mentioned in table 1 and calculated by the implemented experimental method. (a) Energy to channel and (b) energy to FWHM graphs were used for evaluation of the linearity and efficiency of the detectors.

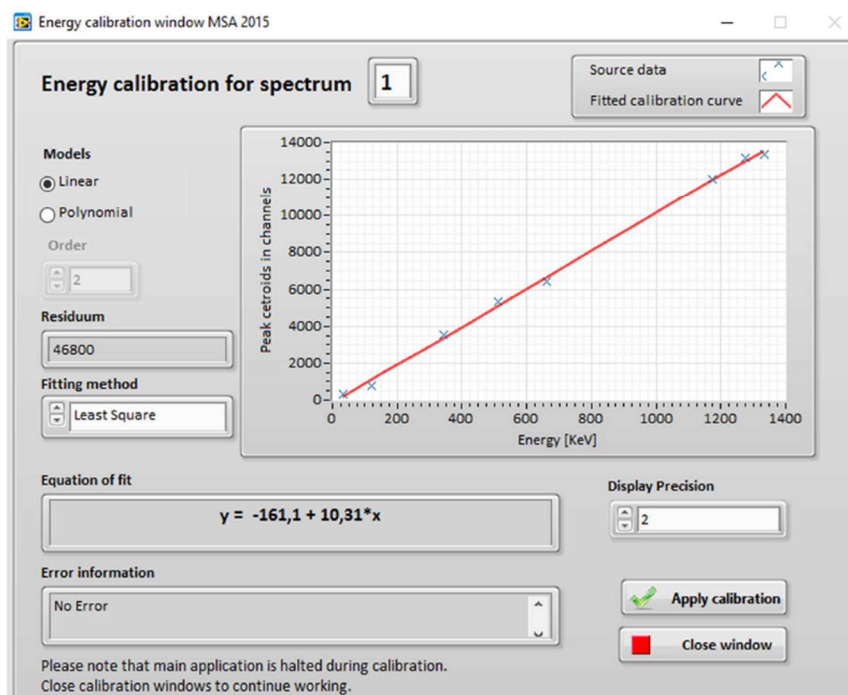


Figure 8. Resulting calibration graph and expression for the Detector1 used in this study. User can set the fit requirements and observe the resulting equation and the fit residuum in real time.

After processing all the MCA spectra, the resulting graphs and tables were used for final calibration. The results shown in figure 7(a) can be fitted by polynomial or linear functions. Figure 8 shows the experimental results for Detector1 fitted by a linear function. This fit uses

Table 2. Numerical results of the fitting process for source-Detector1 distance analyses with four methods used.

Distance Detector1— source [cm]	Gaussian peak fit method [%]	Canberra linear background sup- pression [%]	Canberra step background sup- pression [%]	Ortec Maes- tro algo- rithm [%]
0	100	98	98	98
1	52	51	52	52
2	31	31	30	30
3	21	21	21	21
4	14	14	14	14
5	11	11	11	11
6	7	8	8	8
7	7	7	7	7

Table 3. Numerical results of the fitting process for source-Detector2 distance analyses with four methods used.

Distance Detector2— source [cm]	Gaussian peak fit method [%]	Canberra linear background sup- pression [%]	Canberra step background sup- pression [%]	Ortec Maes- tro algo- rithm [%]
0	83	84	83	84
1	43	45	45	44
2	26	26	25	26
3	16	16	16	16
4	11	11	11	11
5	8	8	8	8
6	6	6	6	6
7	5	5	5	5

the Levenberg–Marquardt algorithm, and the resulted linear expression is displayed in the sub-window of the main application.

In sub-windows generated within the main spectrometric application a user can change some parameters to get higher precision and relevance of the results.

The following equations represent calculated linear fits of the experimental results for both detectors 1 and 2:

$$y_{D1} = -161.10 + 10.31x \quad (2)$$

$$y_{D2} = -220.49 + 9.94x. \quad (3)$$

In the final step of this study, the experimental results gained from the implemented algorithms and calculations were compared with the results taken by algorithms in commercially available systems. Tables 2 and 3 summarize the numerical results of normalized sum of counts under peak area as a dependency on the source-detector distance, where the energy of 661.7 keV of ^{137}Cs was used. Four algorithms were compared for both detectors: (i) Gaussian peak fit method—experimental, (ii) Canberra algorithm with linear background suppression [48], (iii) Canberra algorithm with step background suppression [48], and (iv) Ortec Maestro algorithm [47].

Tables 2 and 3 can be used for comparison of the applied methods and later for comparison of the detectors. All data are normalized to calculations on Detector1 and the Gaussian peak fit method (100%).

Tables 2 and 3 show a selected example where one could see that all the methods have the same results within the experimental errors. We can declare that the developed algorithm is equal to the commercial systems and can be used in laboratory calibration tasks. Note that similar graphs can be generated for all the experimental combinations.

In all calculations performed by the experimental method the linear background correction was applied, while for commercial systems the background correction methods were applied according to the manuals [47, 48].

Conclusion

The digital measurement system presented in this study could be utilized as a metrology system that uses statistical methods to evaluate experimental results with given precision. Gaussian photopeak fitting is implemented in LabVIEW™, and the double-precision floating-point format (DBL) is used in all the calculations within the application, hence no precision seems to be lost due to the round-off numbers. The energy scale calibration of both gamma-ray detectors and other parameter evaluations were performed with various radioactive sources of gamma rays. The experimental results appear to demonstrate a successful comparison with commercial systems. The presented system can be used for calibration of the scintillation detectors and determining the measurement performance of the detector or other unit in the spectrometric system. A detailed analysis of the impact of high activity sources to the detector overloading and/or amplifier saturation is needed and will be done in our later studies. The system has also proved to be effectively used for teaching of bachelor's, master's and doctoral students of applied physics at the Department of Experimental Physics. This is used in the seminars of Virtual instrumentation in nuclear physics experiments.

Acknowledgments

This work was supported by the Scientific Research Council of Celal Bayar University (Project No. 2012-014). The authors give thanks to an internal IGA grant of Palacký University (IGA_PrF_2017_011).

ORCID iDs

Jiri Pechousek  <https://orcid.org/0000-0003-1566-4718>

References

- [1] ISO/IEC 17025 2005 *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* (International Organization for Standardization)
- [2] Koskelo M J and Schwenn H R 2001 Verification of gamma-spectroscopy programs: N42.14 and beyond *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **248** 321–6
- [3] Reguigui N, Morel J, Kraiem H B and Mahjoub A 2002 Characterization of three digital processor systems used in gamma ray spectrometry *Appl. Radiat. Isot.* **56** 93–7
- [4] Mitra S, Wielopolski L and Hendrey G 2004 Comparison of a digital and an analog signal processing system for neutron inelastic gamma-ray spectrometry *Appl. Radiat. Isot.* **61** 1463–8

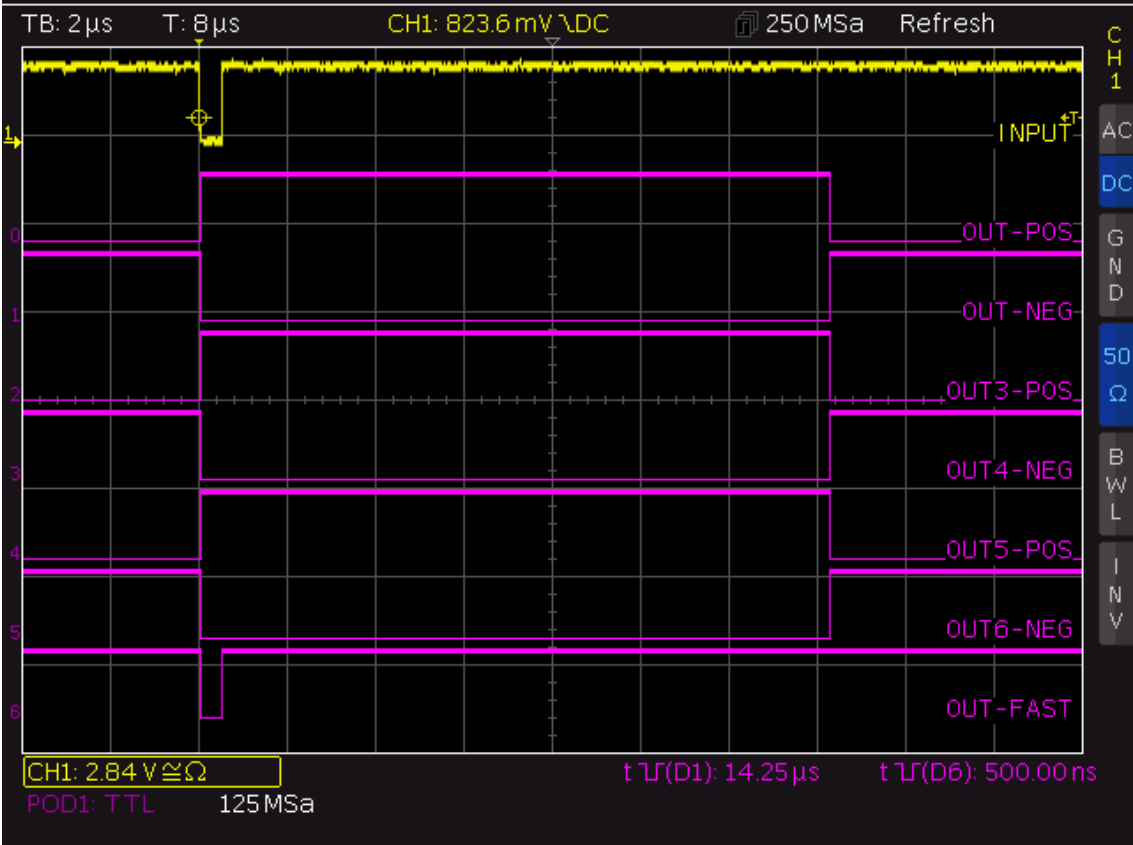
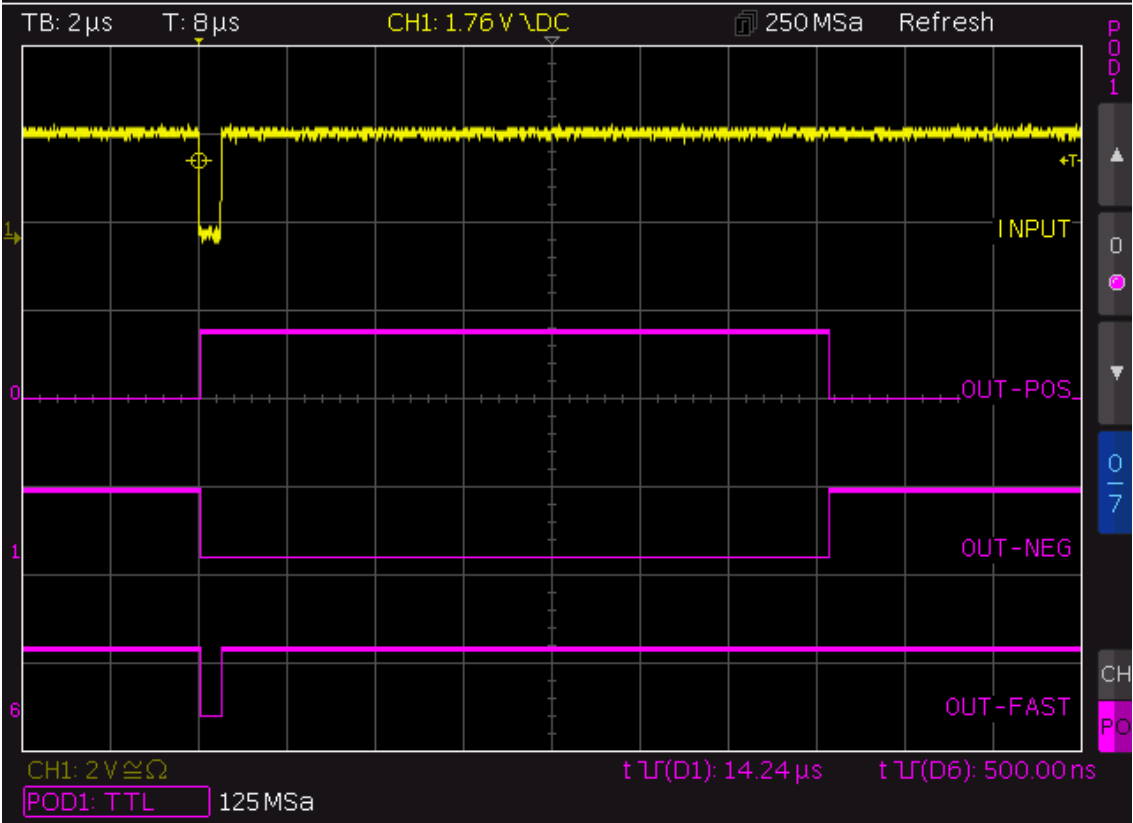
- [5] Scates D M and Hartwell J K 2005 A comparison of the high count-rate performance of three commercially available digital signal processors *Appl. Radiat. Isot.* **63** 465–73
- [6] Zahn G S, Genezini F A and Morales M 2009 Evaluation of peak-fitting software for gamma spectrum analysis 2009 *Int. Nuclear Atlantic Conf.—INAC 2009 (Rio de Janeiro, RJ, Brazil, September 27 to October 2, 2009)* p 10
- [7] Koskelo M J, Sielaff W A, Hall D L, Jordanov V T and Kastner M H 2001 Inspector-2000: a DSP-based, portable, multi-purpose MCA *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **248** 257–62
- [8] Aarnio P A, Nikkinen M T and Routti J T 2001 UNISAMPO, comprehensive software for gamma-spectrum processing *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **248** 371–5
- [9] Kalfas C A and Tsoulou E 2003 SIMULATE program: a gamma ray spectroscopy tool *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A* **500** 386–90
- [10] Hnatowicz V, Ilyushchenko V and Kozma P 1990 GSAP: fortran code for gamma-spectrum analysis *Comput. Phys. Commun.* **60** 111–25
- [11] Koskelo M J and Mercier M T 1990 Verification of gamma spectroscopy programs: a standardized approach *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A* **299** 318–21
- [12] Koskelo M J 1990 Interactive alpha spectroscopy on personal computers *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A* **286** 433–8
- [13] Koskelo M J, Aarnio P A and Routti J T 1981 SAMPO80: an accurate gamma spectrum analysis method for minicomputers *Nucl. Instr. Meth.* **190** 89–99
- [14] Koskelo M J, Aarnio P A and Routti J T 1981 SAMPO80: minicomputer program for gamma spectrum analysis with nuclide identification *Comput. Phys. Commun.* **24** 11–35
- [15] Tecl J, Kovář P and Martykán M 2011 Comparison of the software for a gamma-ray spectrometry *The Safety of Nuclear Energy (Bezpečnost jaderné energie)* **19** in Czech
- [16] Koskelo M J and Mercier M T 1995 Verification of gamma spectroscopy programs: multiplet area problems and solutions *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **193** 211–7
- [17] Mariscotti M A 1967 A method for automatic identification of peaks in the presence of background and its application to spectrum analysis *Nucl. Instr. Meth.* **50** 309–20
- [18] Robertson A, Prestwich W V and Kennett T J 1972 An automatic peak-extraction technique *Nucl. Instr. Meth.* **100** 317–24
- [19] Mercier M T and Koskelo M J 1992 Verification of gamma-spectroscopy programs: accuracy and detectability *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **160** 233–43
- [20] Aarnio P A, Nikkinen M T and Routti J T 1992 SAMPO 90 high resolution interactive gamma-spectrum analysis including automation with macros *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **160** 289–96
- [21] Scuffham J, Veale M C, Wilson M D and Sellar P 2013 Algorithms for spectral calibration of energy-resolving small-pixel detectors *J. Instrum.* **8** P10024
- [22] Teoh W 1973 CUTIPE—a computer program to analyze gamma-ray spectra *Nucl. Instr. Meth.* **109** 509–13
- [23] Barnes V 1968 GASPAN—an advanced computer code for the analysis of high resolution gamma-ray spectra *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS15** 437–54
- [24] Routti J T and Prussin S G 1969 Photopeak method for the computer analysis of gamma-ray spectra from semiconductor detectors *Nucl. Instr. Meth.* **72** 125–42
- [25] Koskelo M J 1987 Count rate effects in analysis programs using fitting techniques *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **114** 215–21
- [26] Zhang W, Zähringer M, Ungar K and Hoffman I 2008 Statistical analysis of uncertainties of gamma-peak identification and area calculation in particulate air-filter environment radionuclide measurements using the results of a Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO) organized intercomparison: I. Assessment of reliability and uncertainties of isotope detection and energy precision using artificial spiked test spectra: II. Assessment of the true type I error rate and the quality of peak area estimators in relation to type II errors using large numbers of natural spectra *Appl. Radiat. Isot.* **66** 1695–701
- [27] Quintana B and Fernández F 1998 Gamma-ray spectral analysis with the COSPAJ continuum fitting routine *Appl. Radiat. Isot.* **49** 1235–40
- [28] Quintana B and Fernández F 1998 Continuous component determination in γ -ray spectra *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A* **411** 475–93
- [29] Koskelo M J, Venkataraman R and Kolotov V P 2001 Coincidence summing corrections using alternative detector characterization data *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **248** 333–7

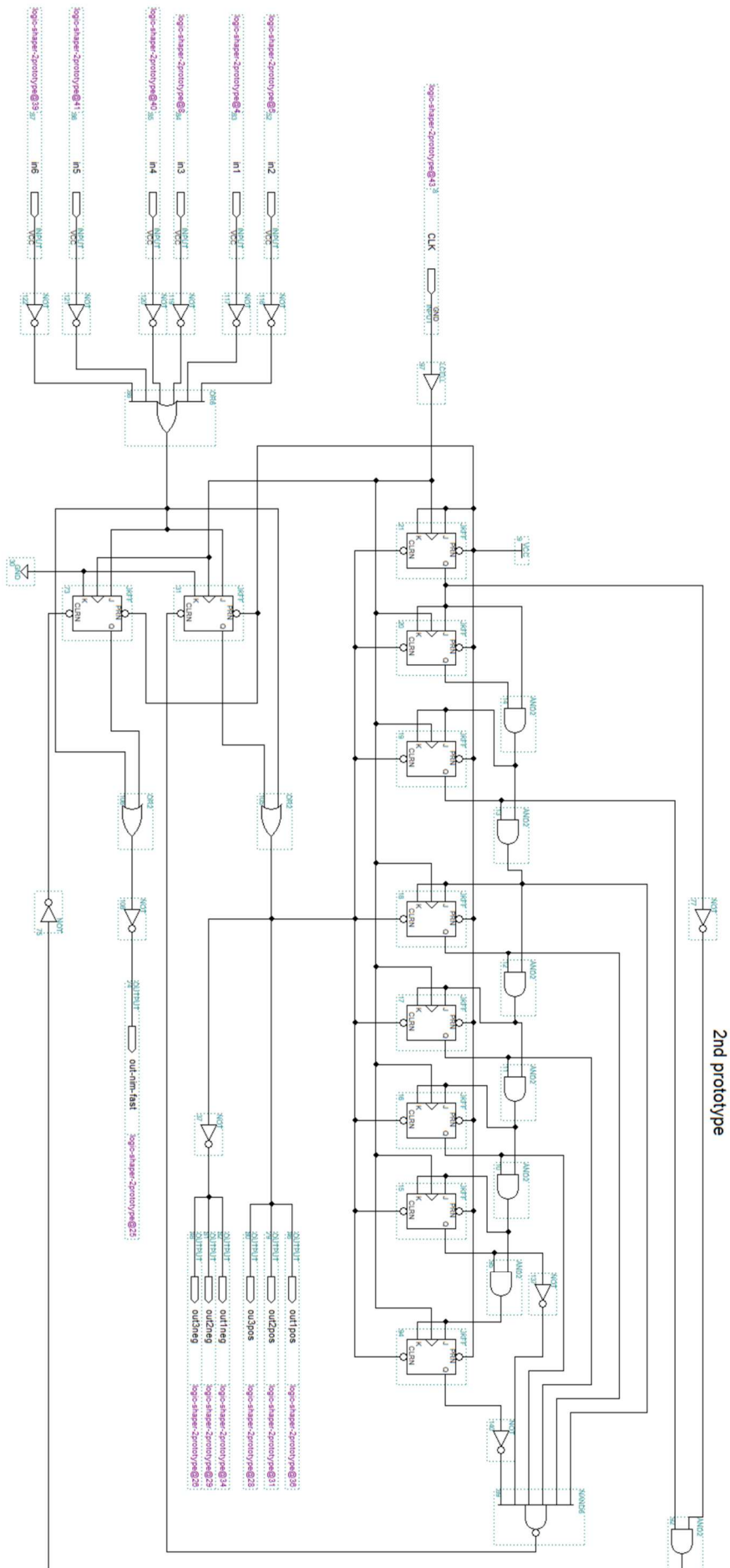
- [30] Gavron A 1969 Automation of the analysis of gamma ray spectra of radionuclide mixtures, with special reference to computer spectrum shifting and dead time correction *Nucl. Instr. Meth.* **67** 245–50
- [31] Luca A, Neacsu B, Antohe A and Sahagia M 2012 Calibration of the high and low resolution gamma-ray spectrometers *Romanian Reports in Physics* **64** 968–76
- [32] Ahmed S N 2007 *Physics and Engineering of Radiation Detection* 1st edn (London: Academic)
- [33] Gilmore G 2008 *Practical Gamma-ray Spectroscopy* 2nd edn (Chichester: Wiley)
- [34] Tadros N N and Rasha S M A 2013 Improved system for the automatic calibration of standard resistors in the meg-ohm range *Measurement* **46** 2077–81
- [35] Myllyla R and Karras M 1978 On distance measurement with coincident gamma rays *Metrologia* **14** 123–5
- [36] Keightley J and Soon Park T 2007 Digital coincidence counting for radionuclide standardization *Metrologia* **44** S32–5
- [37] Havelka M 2012 Improvement of software coincidence counting system for standardisation of EC- $\beta\beta$ radionuclides *Appl. Radiat. Isot.* **70** 2051–5
- [38] Havelka M and Sochorova J 2008 Standardisation of ^{56}Co and ^{57}Co using software coincidence counting system *Appl. Radiat. Isot.* **66** 914–8
- [39] Havelka M, Auerbach P and Sochorova J 2002 Software coincidence counting *Appl. Radiat. Isot.* **56** 265–8
- [40] Abdel-Aal R E 1993 Simulation and analysis of nuclear physics instrumentation using the LabVIEW graphical programming environment *Arabian J. Sci. Eng.* **18** 365–82
- [41] Pechousek J and Mashlan M 2005 Mössbauer spectrometer in the PXI/CompactPCI modular system *Czech. J. Phys.* **55** 853–63
- [42] Pechousek J, Mashlan M, Frydrych J, Jancik D and Prochazka R 2007 Improving detector signal processing with pulse height analysis in Mössbauer spectrometers *Hyperfine Interact.* **107** 1–8
- [43] Pechousek J, Prochazka R, Jancik D, Mashlan M and Frydrych J 2010 Universal LabVIEW-powered Mössbauer spectrometer based on the USB, PCI or PXI devices *J. Phys.: Conf. Ser.* **217** 012006
- [44] Pechousek J, Prochazka R, Prochazka V and Frydrych J 2011 Virtual instrumentation technique used in the nuclear digital signal processing system design: energy and time measurement test *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **637** 200–5
- [45] Walter J, Barreiro M, Sajo-Bohus L, Greaves E D and Gonzales W 2005 New approach in add-on multi-channel analyser for gamma ray spectrometry *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A* **545** 776–83
- [46] Marquardt D W 1963 An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters *J. Soc. Indust. Appl. Math.* **11** 431–41
- [47] MAESTRO®-32 MCA Emulator for Microsoft® Windows® 2000 Professional and XP® Professional, Software User's Manual (2008) ORTEC, AMETEK
- [48] ProSpect Gamma Spectroscopy Software User's Manual (2012) Canberra Industries, Inc.

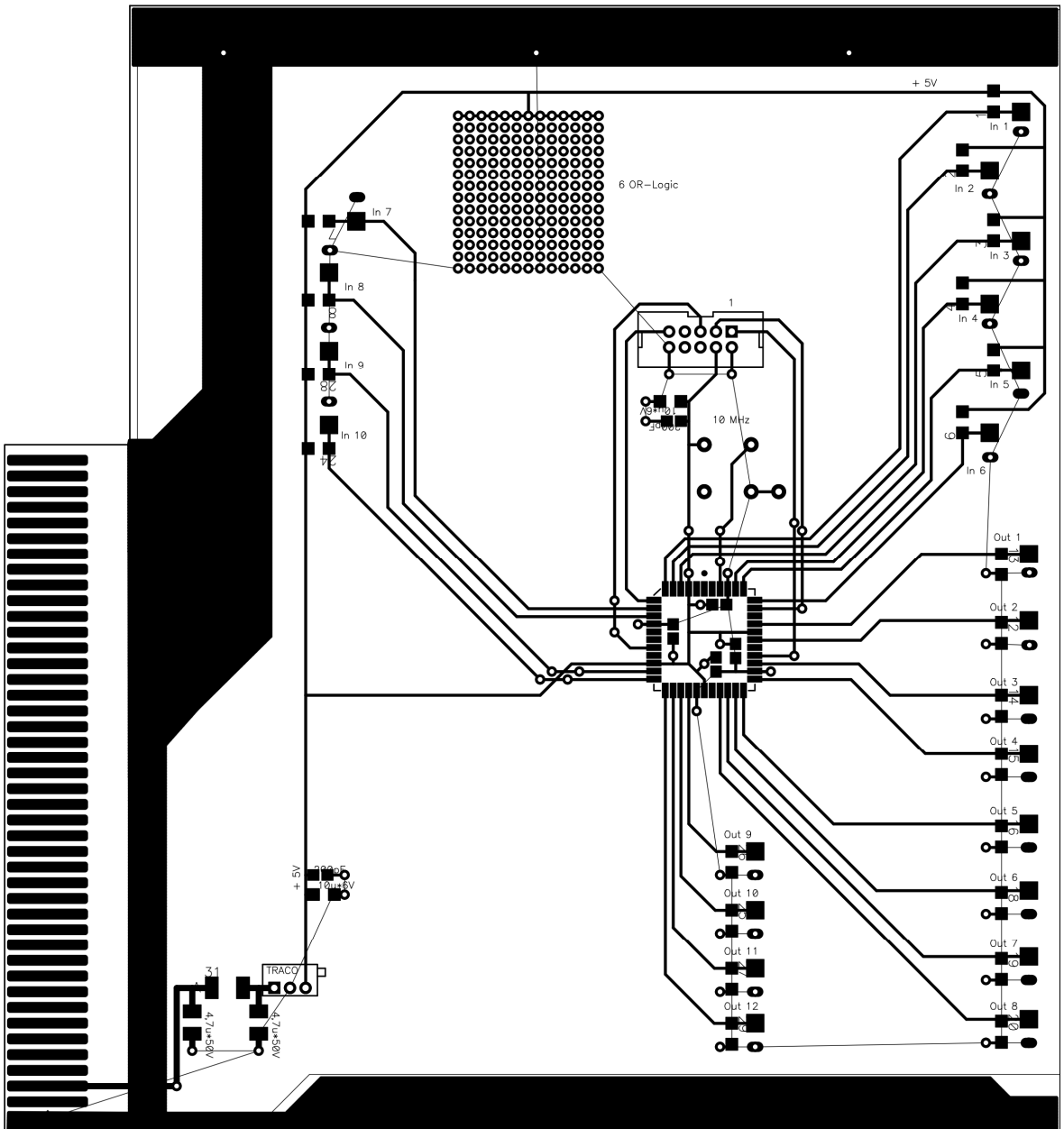
Příloha 1 Navržený modul pro spektrometr 6-ИЛИ



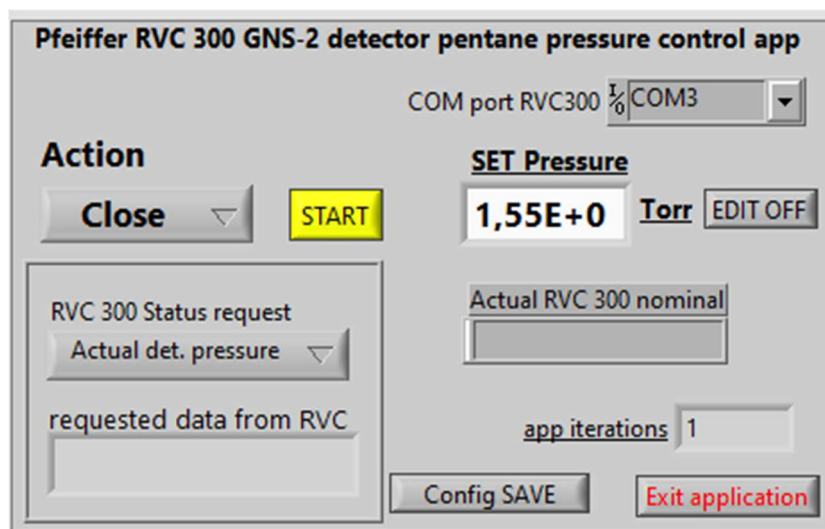
Tento navržený modul 6-ИЛИ provádí logické OR nad osmi TTL invertovaných vstupech. Výstup je přetvarován s časovou konstantou 14 μ s. Jsou zde tři skupiny výstupů. Každý má pozitivní a invertovaný výstup. Výstup č. 4 má přetvarování na 0,8 μ s. Mechanika a sběrnice je uzpůsobená pro použití v CAMAC standardu. Vyrobili jsme tři kusy. Jeden prototyp a dva pro ostrý provoz. Jeden se používá pro příznak koincidence s proporcionální drátkovou komorou. Tento příznak se v analogovém spektrometru píše ke každému eventu (částici) a říká vám, jestli částice právě přiletěla ze separátoru, jelikož dala signál z dE1 a dE2 elektrod (viz příloha D) anebo jestli je to signál z dříve implantovaných prvků do detektoru s dlouhými poločasy rozpadu. Toto rozlišení mezi šumem a novým užitečným signálem je při spektrometrii velmi malých statistik účinné zpřesnění pro pozdější analýzu dat. Posléze na základě experimentálních měření jsme snížili toto koincidenční okno na 7 μ s z důvodu snížení mrtvé doby spektrometru CAMAC.







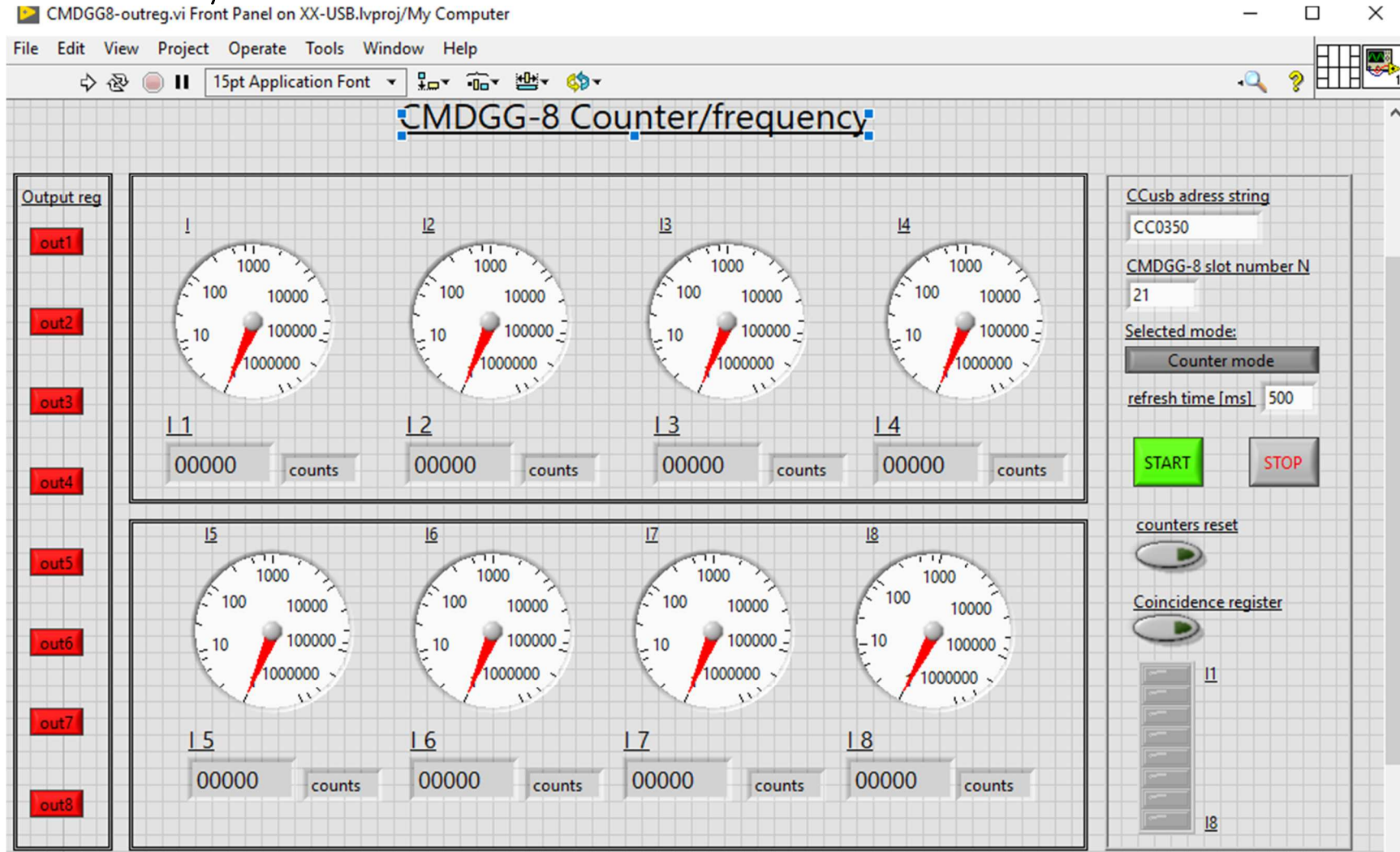
Příloha 2 Aplikace pro vzdálené řízení PID regulátoru průtoku pentanem v detektoru



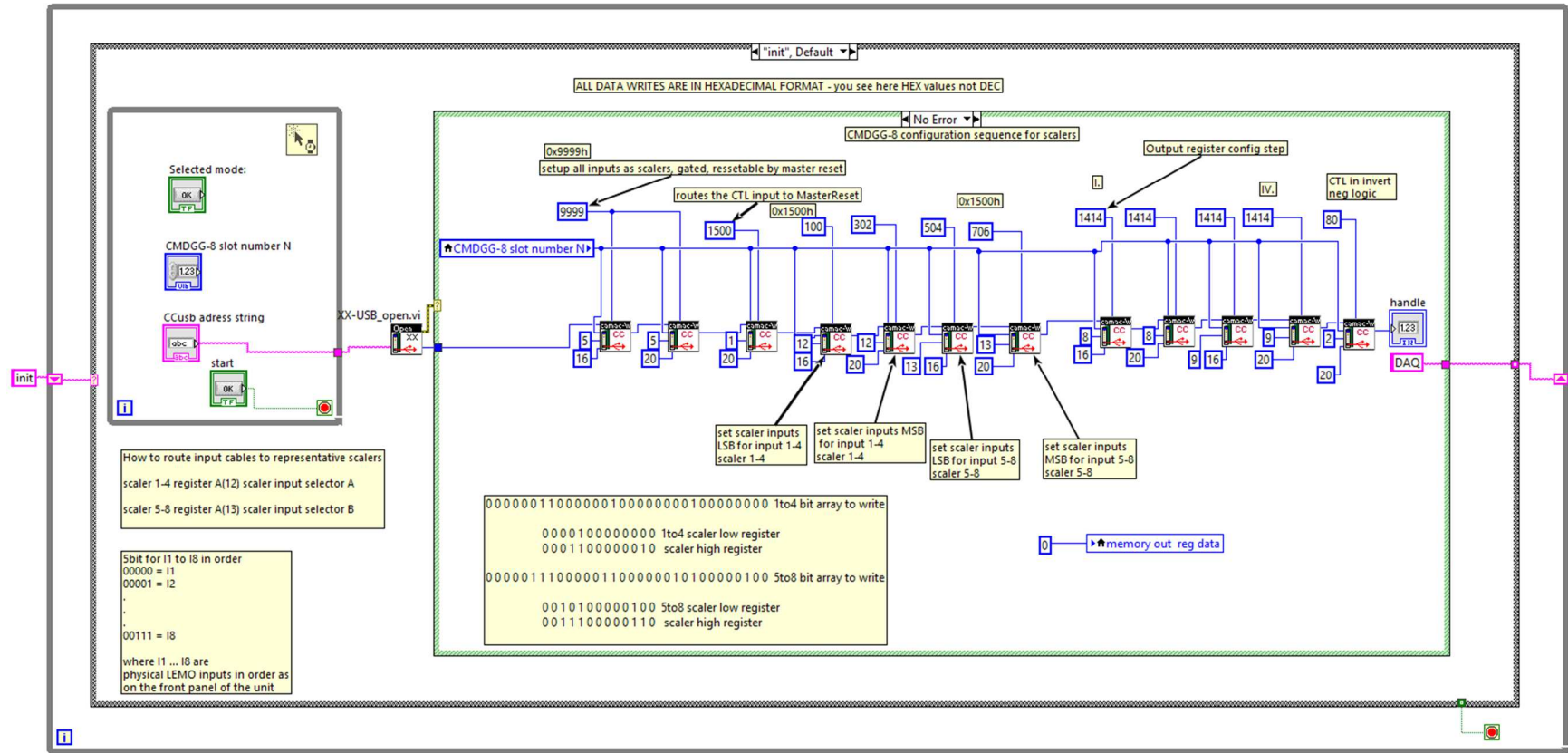
Aplikace pro vzdálené řízení průtoku pentanu v detektorovém objemu byla navržena na základě požadavků nechodit do experimentální haly ručně regulovat pomocí jehlových ventilů a otáček vývěvy tlak a průtok plynu. Pomocí elektromechanického ventilu řízeného pomocí kontroléru Pfeiffer RVC300 lze nastavit žádoucí tlak v detektorovém objemu, či uzavřít ventil, když je experiment u konce, či při plánované odstavce.

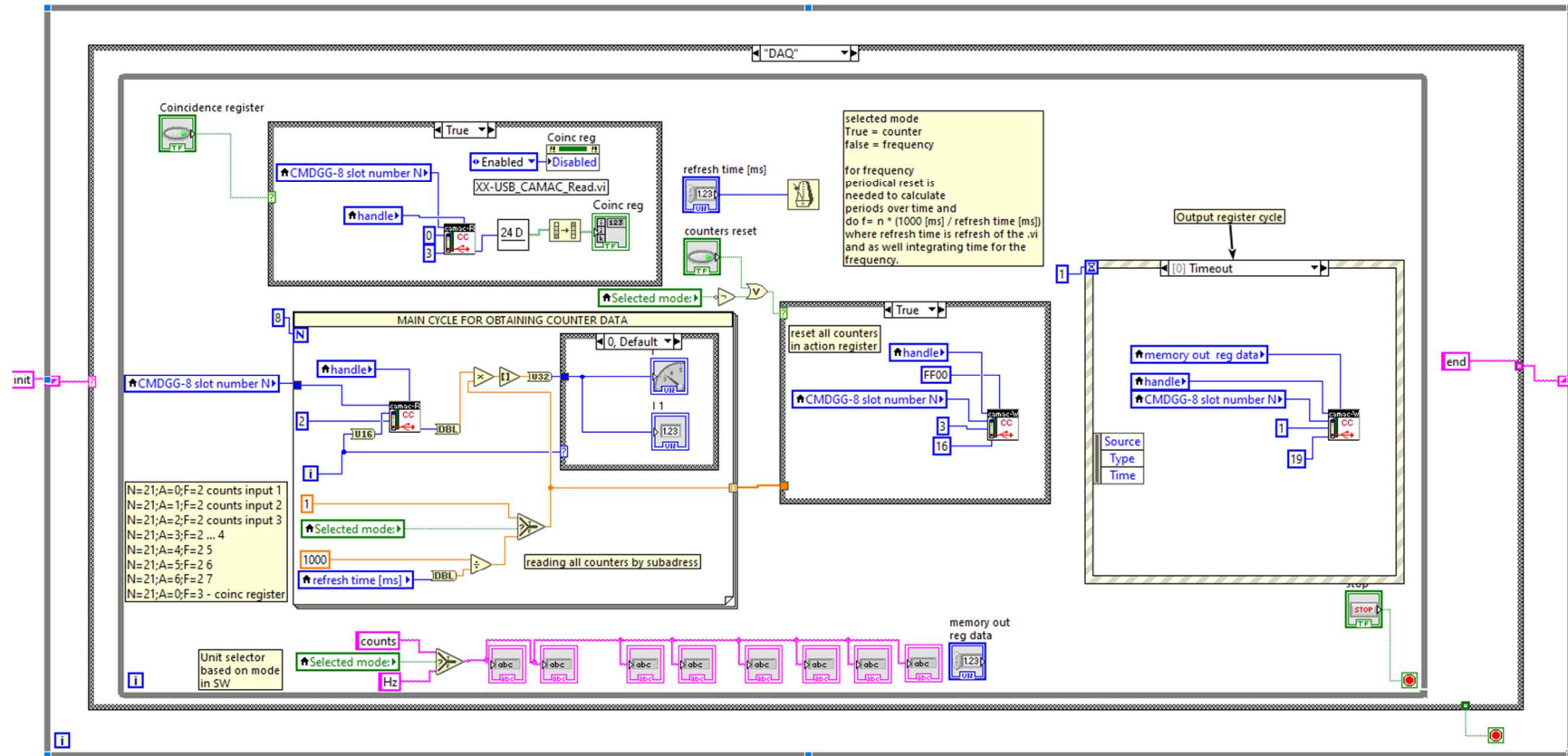
Pro realizaci softwaru bylo využito přístrojových ovladačů Pfeiffer RVC300 implementovaných do jádra aplikace na NI LabVIEW, hotový „.exe“ soubor běží v dozorně experimentu a umožní monitorovat současný stav kontroléru, nastavit režim udržování tlaku či uzavřít sekci. Zdrojové kódy zde nepřikládám z důvodu jejich komplexnosti. Možno je prohlédnout na přiloženém DVD disku.

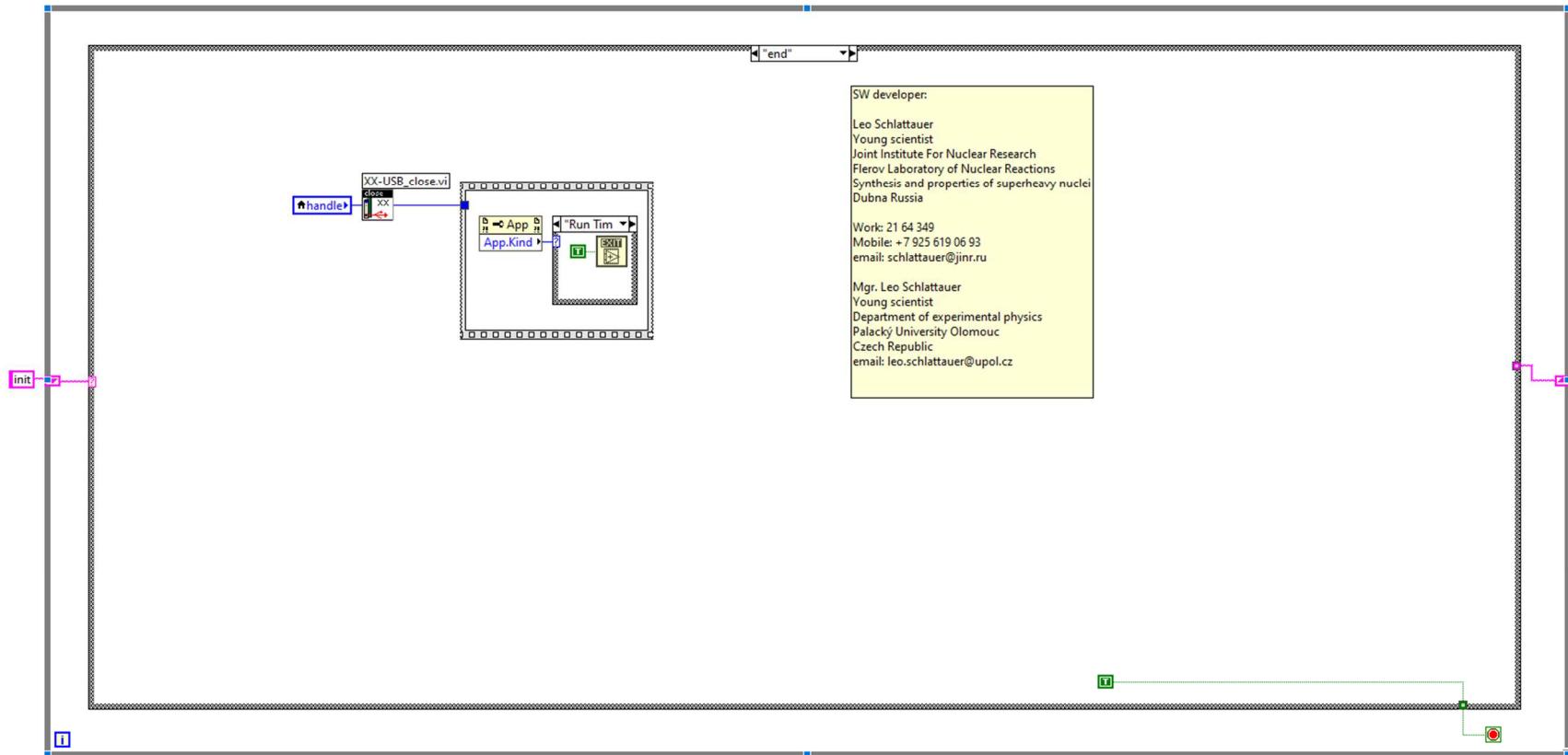
Příloha 3 realizace osmi čítačů / intenzimetrů a 8bitového výstupního registru za pomoci NI LabVIEW, kontroléru Wiener CC USB a univerzální karty CMDGG-8



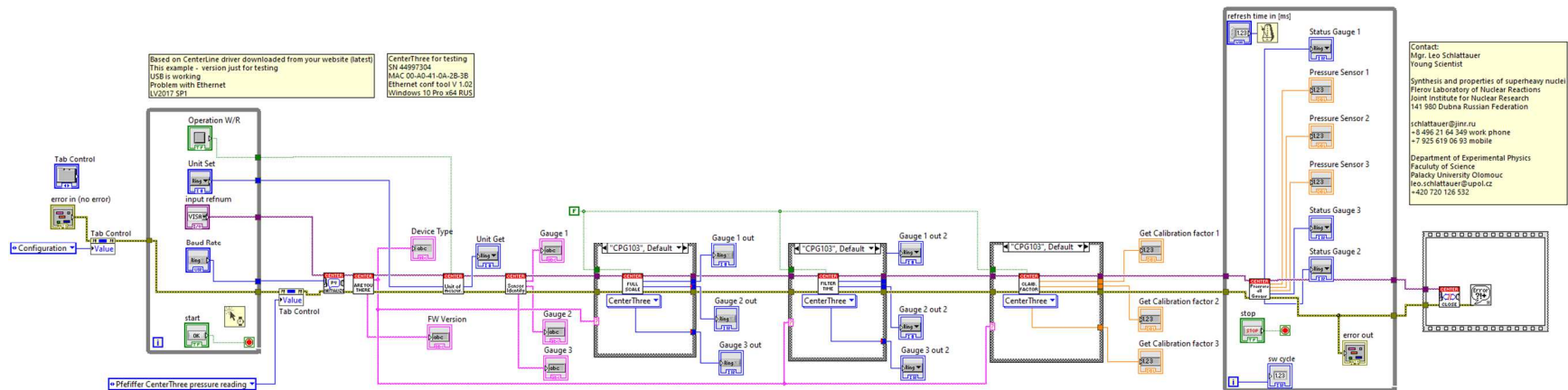
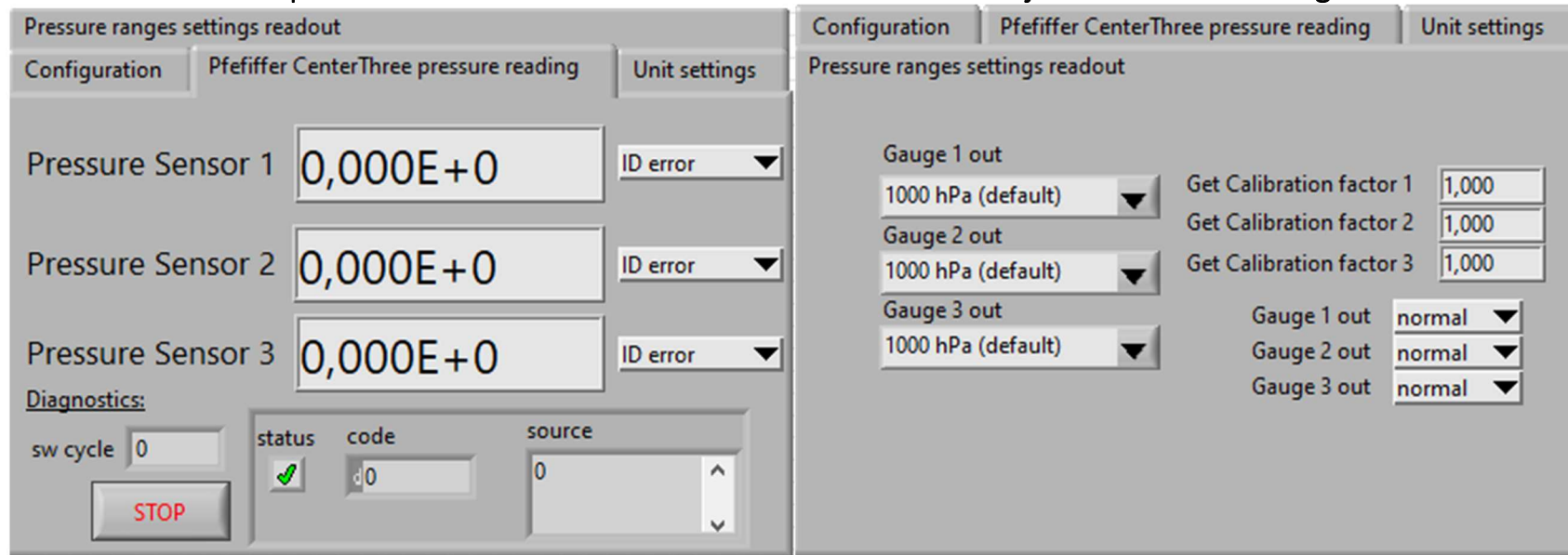
Tato aplikace umožňuje využít univerzální modul Wiener CMDGG-8 jako osm nezávislých intenzimetrů / čítačů s TLL vstupy. Zároveň jako osmi bitový výstupní registr. Využito je zde na míru upraveného FW karty CMDGG-8 výrobcem pro naše účely, kontroléru sběrnice CAMAC CC USB a jeho LabVIEW ovladačů. Zdrojový kód pro svoji jednoduchost přikládám dále. Dále je možno jej otevřít na přiloženém DVD



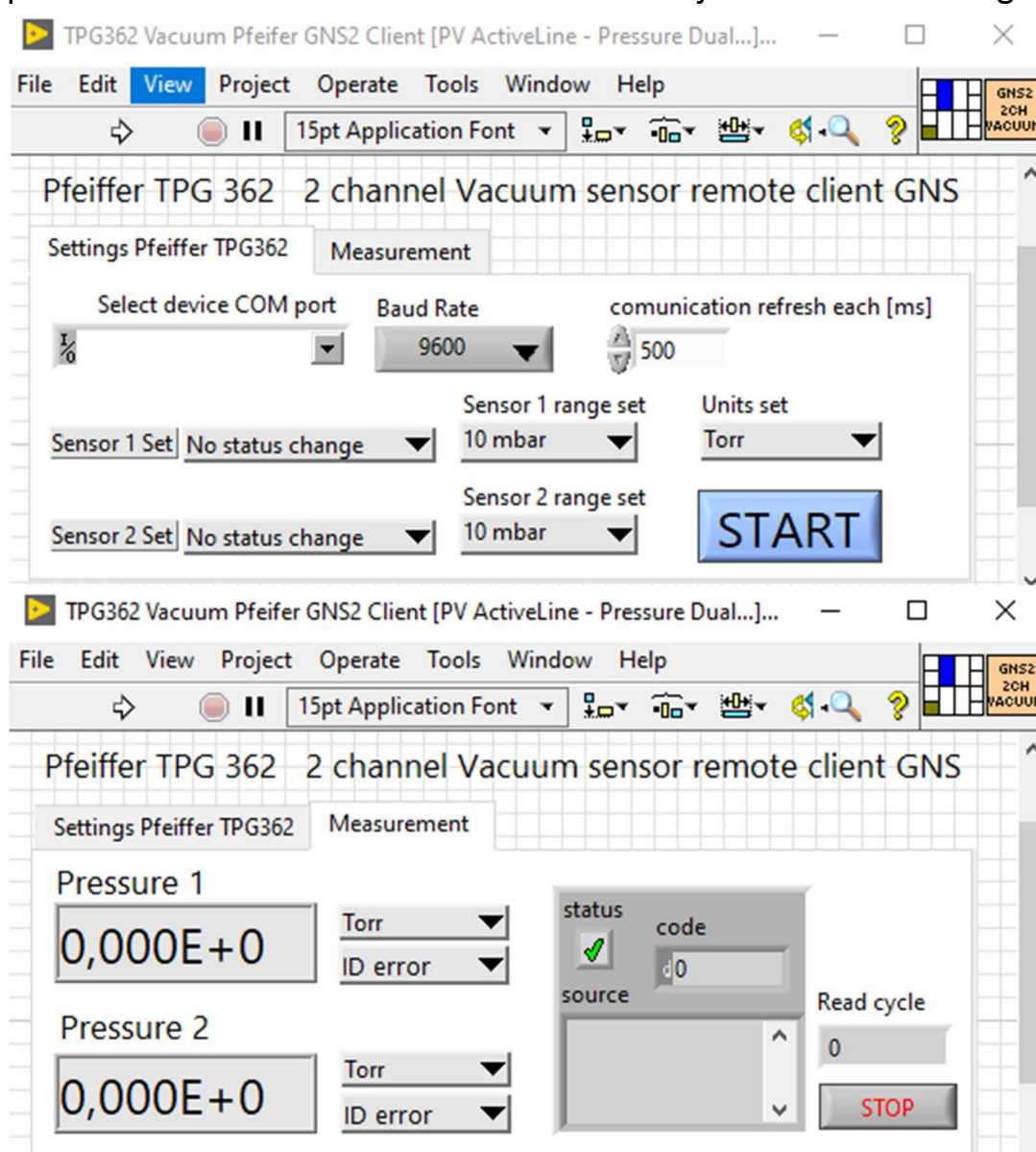


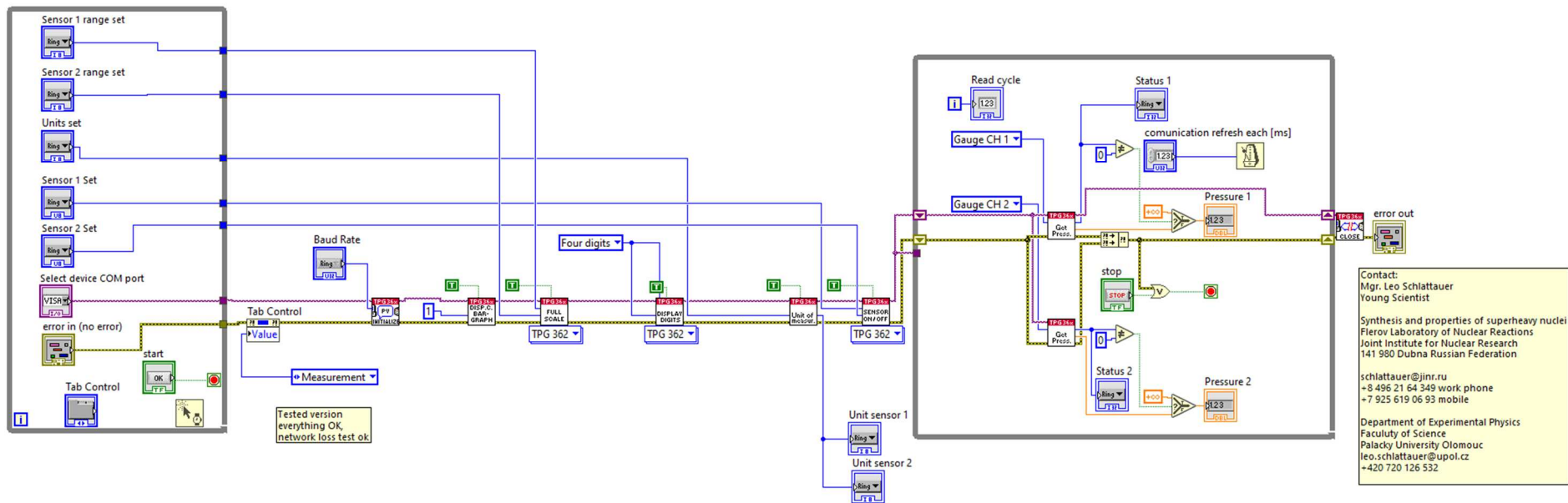


Příloha 4 Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer CenterThree a jeho vzdálenou konfiguraci.

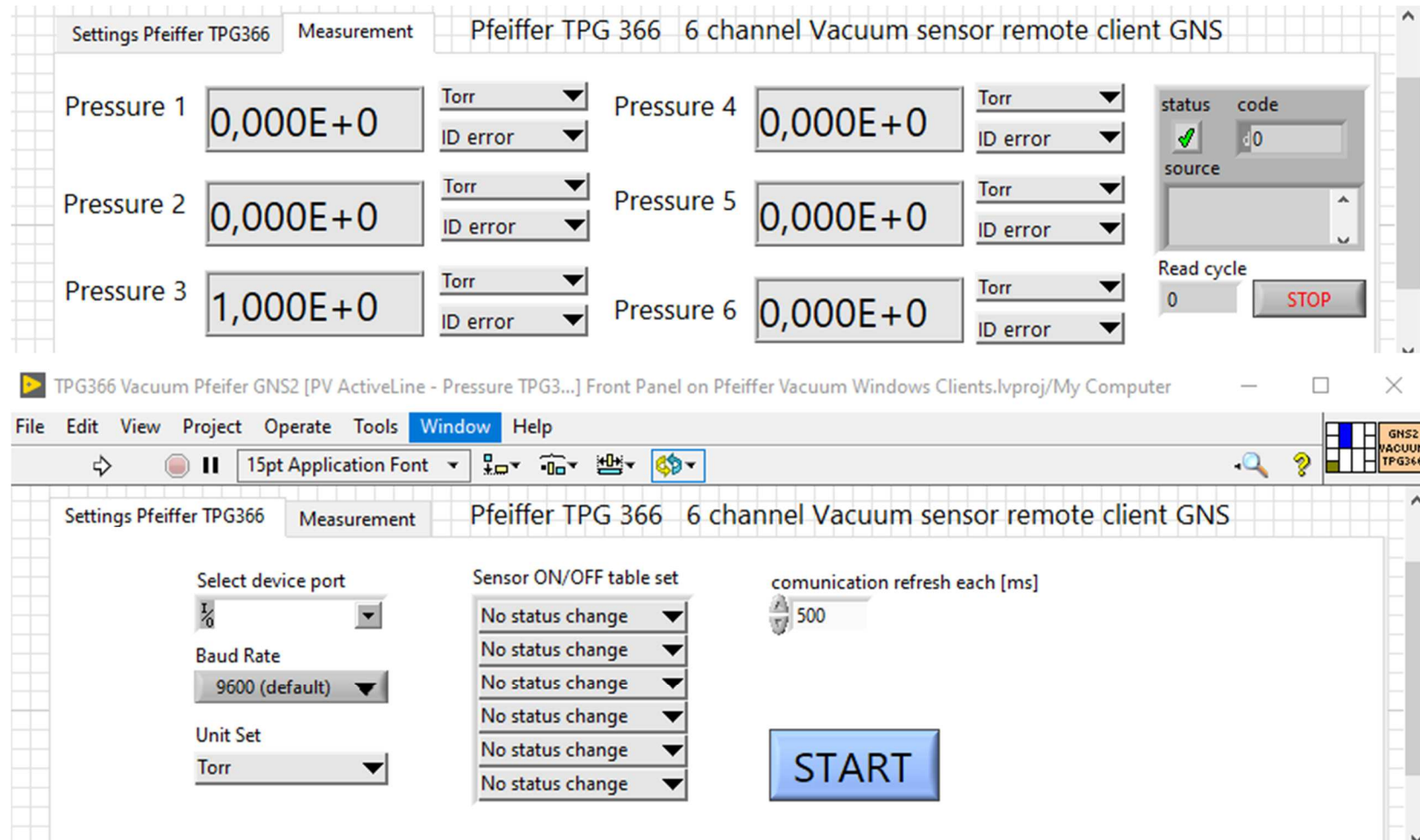


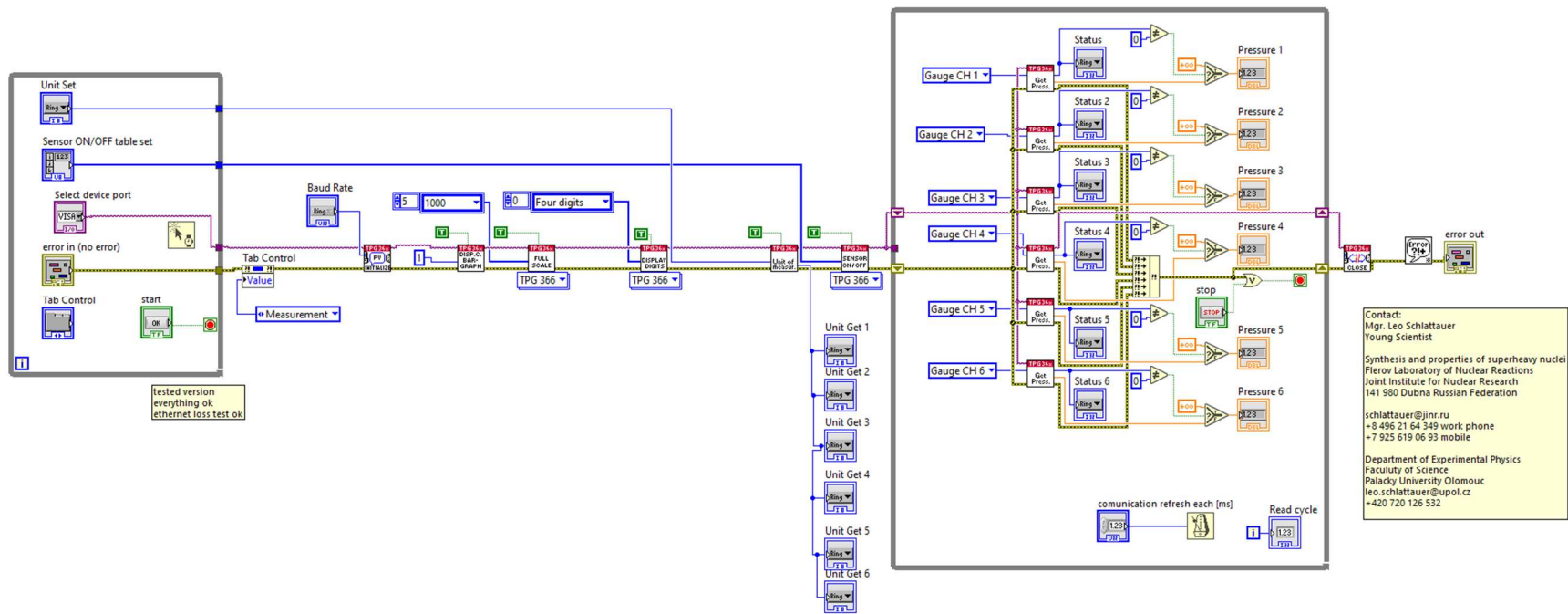
Příloha 5 Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer TPG362 a jeho vzdálenou konfiguraci.



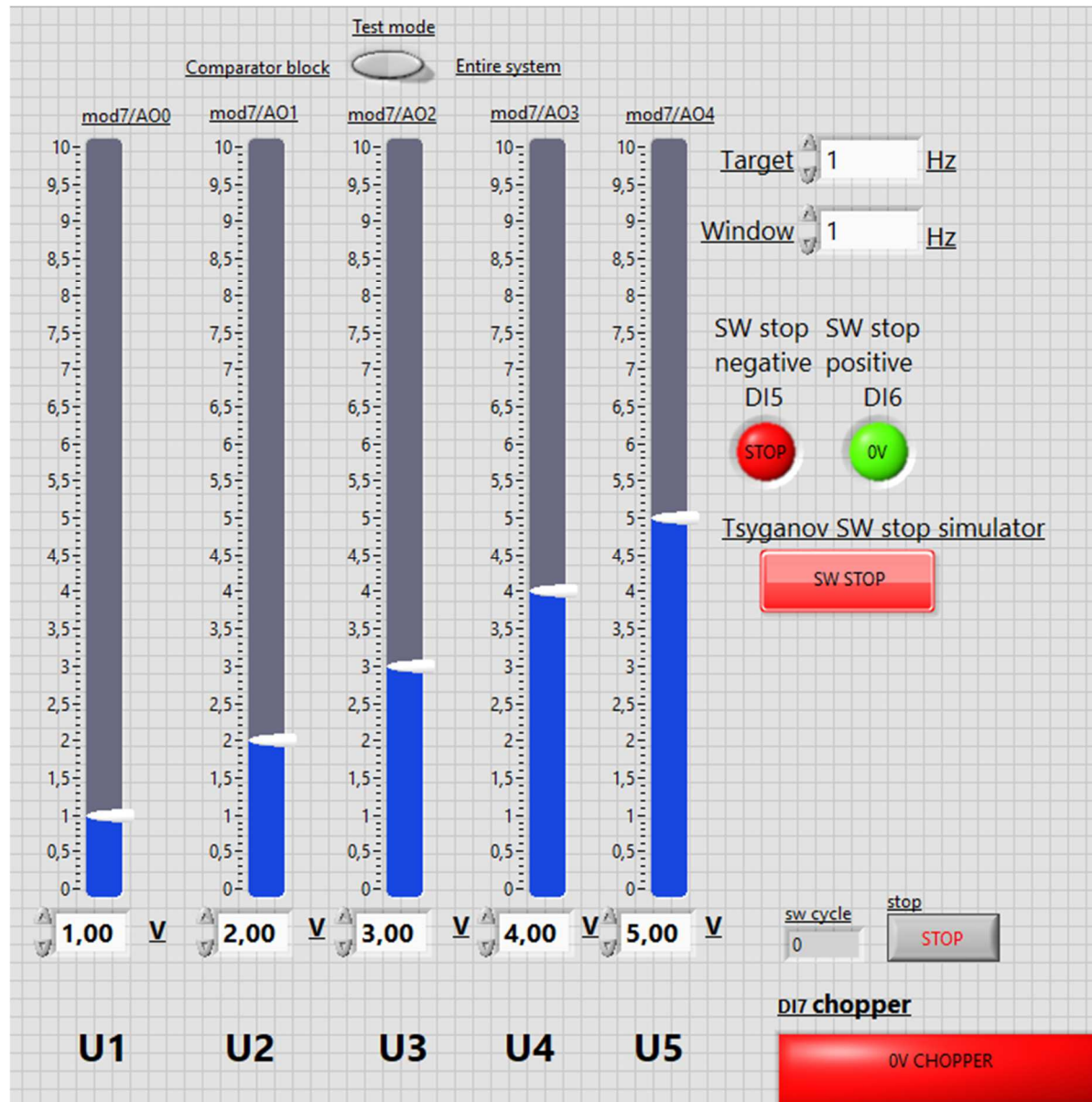


Příloha 6 Realizace klienta pro měření tlaků z kontroléru Pfeiffer TPG366 a jeho vzdálenou konfiguraci.





Příloha 7 Realizace přípravku pro nastavení modulu komparátorů technologických parametrů DGFRS-II na úrovni HW.



Modul komparátorů společně s modulem kontroly otáčení jsou dva moduly, které kontrolují na elementární úrovni, jestli napětí je vyšší než práh. Tato elektronika je velmi jednoduchá a odolná proti radiaci a funguje při zapnutí napájení okamžitě. Zde byl kladen důraz na spolehlivost. Představený přední panel je realizován pro test takovýchto modulů. S pomocí NI LabVIEW a NI CompactRIO platformy bylo realizováno generování dvou různých frekvencí, 5 úrovní napětí, jednoho stavu zapnuto vypnuto pro simulace příchodu kandidáta na supertěžký prvek a vizualizaci výsledků.

Aplikace má dva režimy, nastavení pouze modulu komparátorů a kontrolu celého CAMAC subsystému jak byl představen v textu práce kapitoly 6. S pomocí tohoto vyvinutého nástroje bylo snadné systém ověřit na jeho dlouhodobou stabilitu a taktéž nastavit na požadované provozní parametry. Tato aplikace není nosná pro experiment a pro ji zmiňuji v příloze pro zajímavost. Zdrojové kódy jsou pro komplexnost na přiloženém DVD.

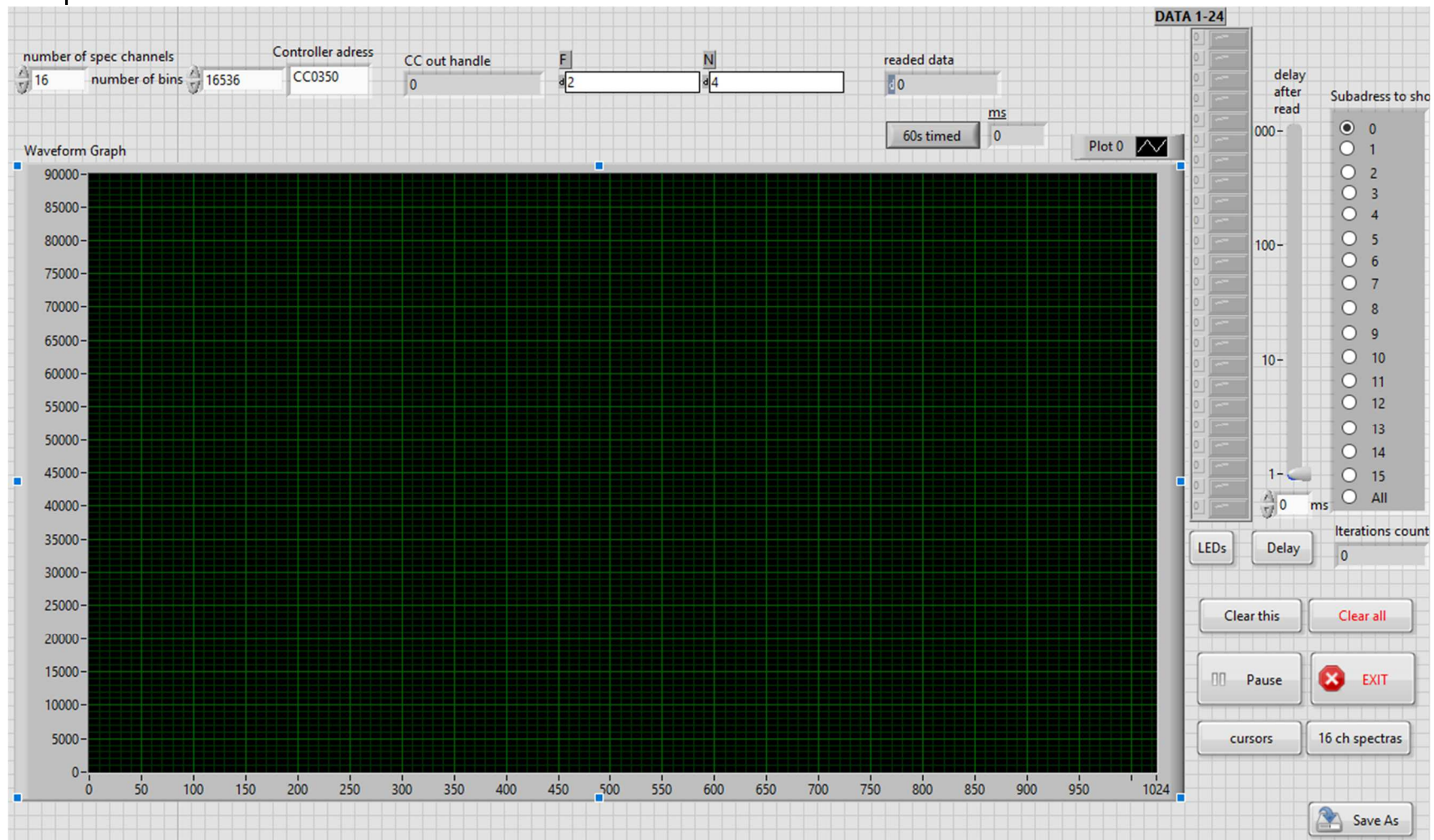
Příloha 8 Automatický test starých vstupních registrů sběrnice CAMAC.

The screenshot displays a LabVIEW control panel for an automatic test of CAMAC input registers. Key components include:

- Control Panels:** 'cRIO to KR005 input' and 'ccUSB CAMAC readed data' both showing a value of 0.
- Controller Address:** Fields for 'F' (CC0350), 'A' (2), and 'N' (14).
- Test Parameters:** 'automatic' indicator (green), 'Iterations counter' (0), and buttons for 'EXIT' and 'Delay'.
- Data Display:** 'DATA 1-24' showing a vertical list of 24 bits, all currently 0.
- Timing:** 'delay after read' slider set to 111 ms.
- Results:** 'autotest end' counter at 65535 and a 'mistakes by KR005' table with all zeros.

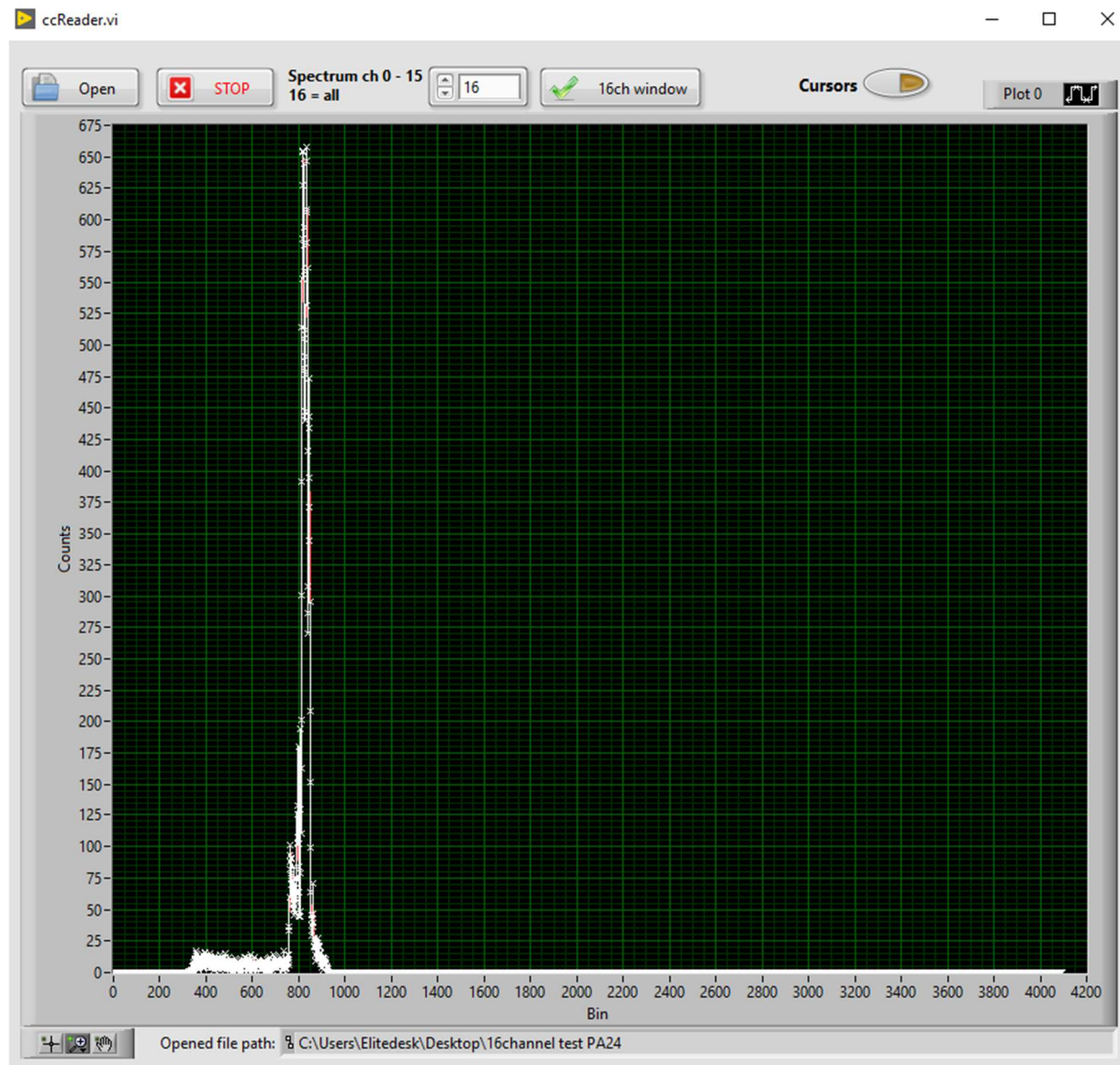
Subsystem analogového spektrometru je postaven na komponentech převážně z 80 tých let. Jedná se o jednoduchý a robustní systém, který má nízké latence mezi příchodem signálu a jeho fyzickou přítomností v paměti počítače. Většinou se jedná o jednotky mikrosekund. Z důvodu nedostatku pracovní síly nebylo možné migrovat spektrometr na modernější platformy a bylo nutné prověřit některé staré moduly na spolehlivost. Za tím účelem byl vytvořen na platformě NI LabVIEW a NI CompactRIO automatický test 24 bitového vstupního registru CAMAC, který automaticky vystaví každý bit z 0 do 1 a ověří jestli CAMAC čte to stejné. Jedná se o hybridní systém mezi CAMAC a NI CompactRIO a MS Windows, který ale efektivně prověří všech 2^{24} kombinací vstupních registrů a ukáže při kterých kombinacích vstupní registr vrací rozdílnou hodnotu. Počty vadných kombinací je možné porovnat mezi moduly a vybrat ten nejlepší. Ukázalo se totiž v praxi, že některé moduly jsou funkční po stránce individualních bitů, ale jsou nefungující kombinace binárních stavů a tudíž v procesu sběru dat dochází k nepředvídatelným chybám. Nalezli jsme ze 7 modulů data výroby 1976 až 1994 jeden plně funkční a jeden funkční z 81%. Prototyp nového modulu na bázi Intel CPLD nebyl dokončen plně k datu vzniku práce.

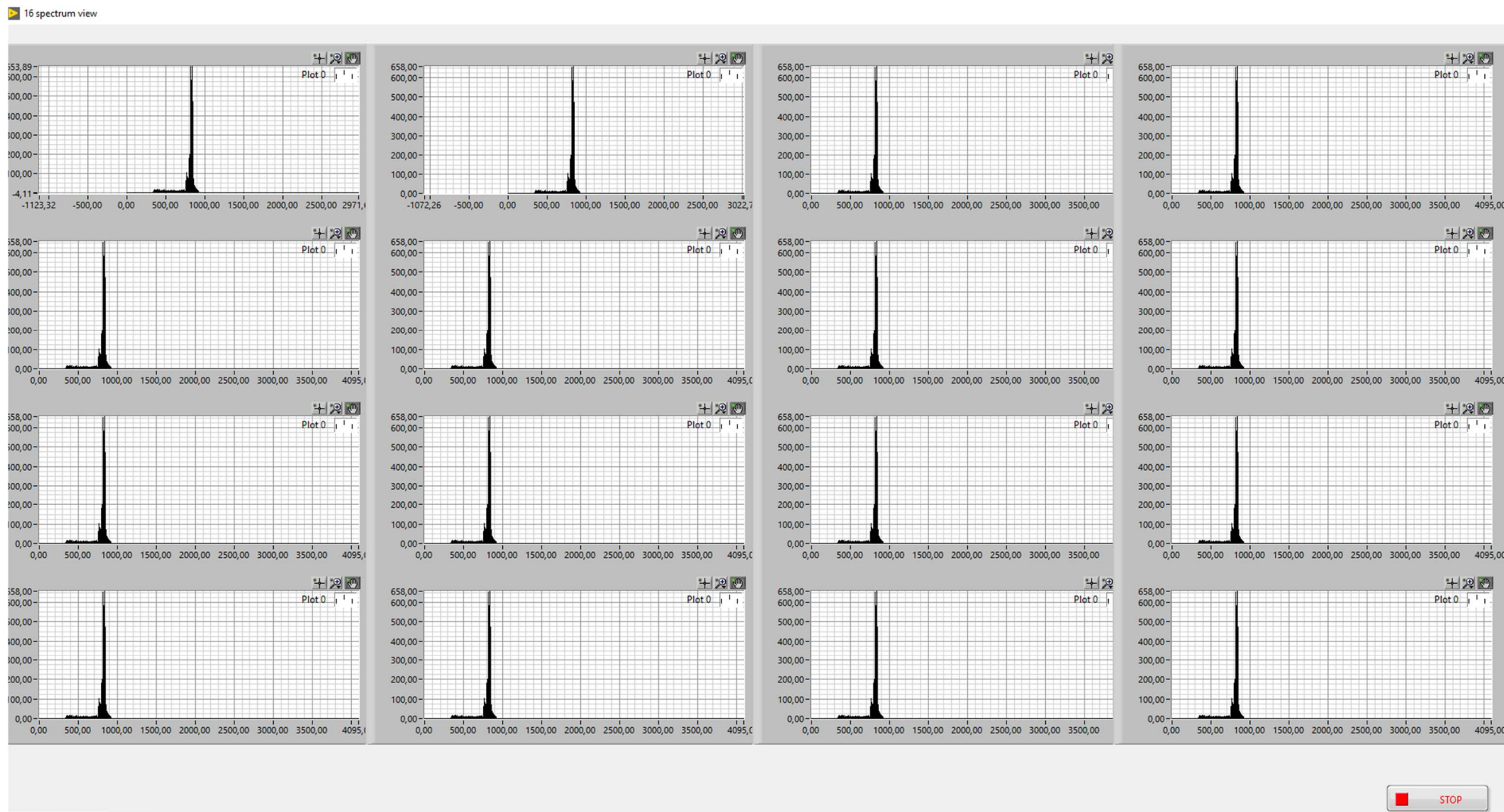
Příloha 9 Spektrometr CAMAC na bázi NI LabVIEW a kontroleru Wiener XX USB



Spektrometr využívající karty navržené v Laboratoři jaderných reakcí s moderním interfacem byl napsán na základě potřeby rychlého ověření funkčnosti MCA karet pro použití v experimentu. Tento univerzální software umožňuje vykonat libovolné funkce sběrnice CAMAC – příkazy N()A()F() LAM X S1,S2 a umí pracovat se spektrem, které je možné uložit do souboru a později vizualizovat v MCA analyzátoru navrženém v rámci diplomové práce (Jednotný systém pro charakterizaci HW(analogový/digitální) a SW prvků používaných v MCA jaderných systémech, Leo Schlattauer, 2015, KEF, PŘF UP v Olomouci) nebo v libovolném editoru textových dat např. Origin, MATLAB aj.

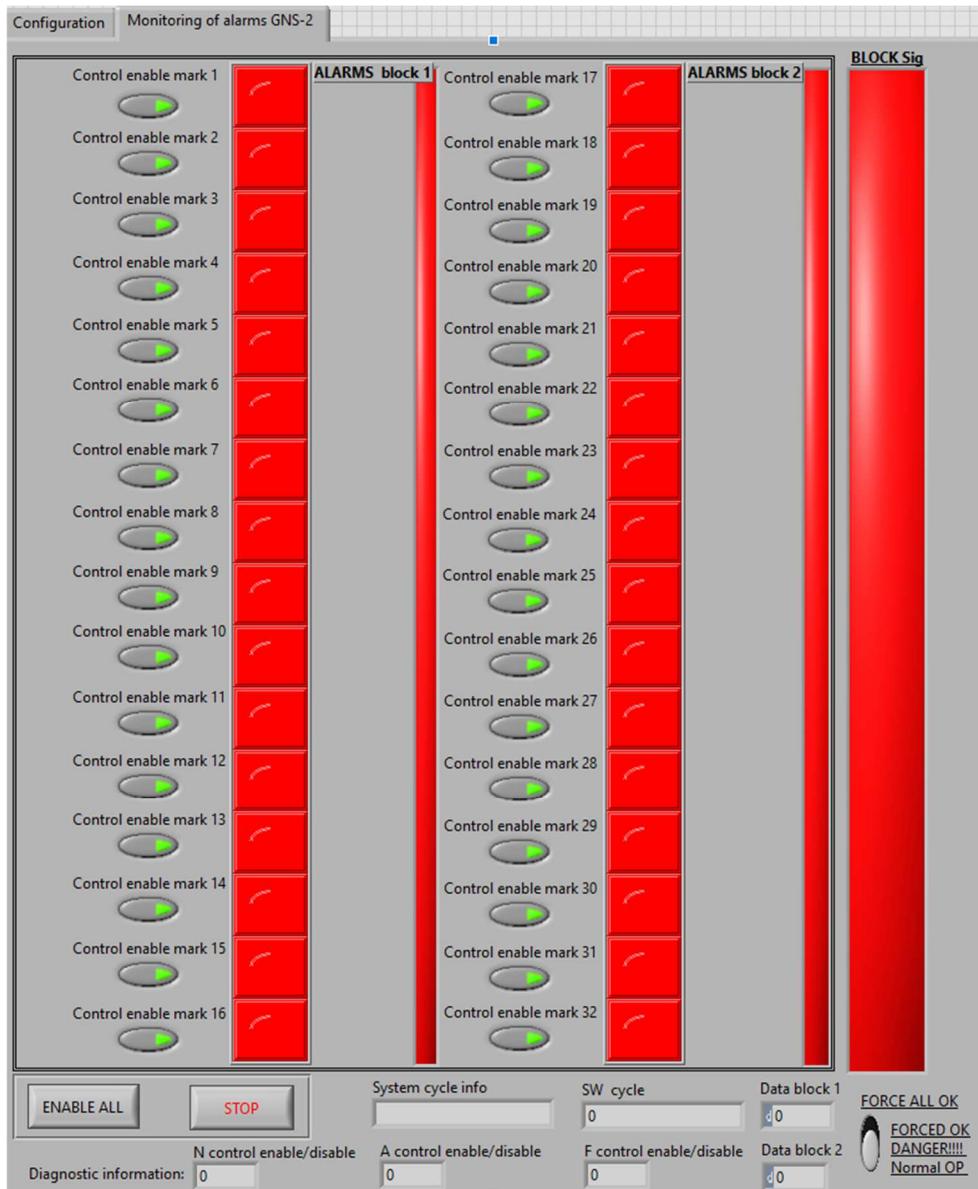
Příloha 10 Program pro vizualizaci 16 kanálových spekter s možností otevřít 16 spekter v novém okně jako paralelní procesy.





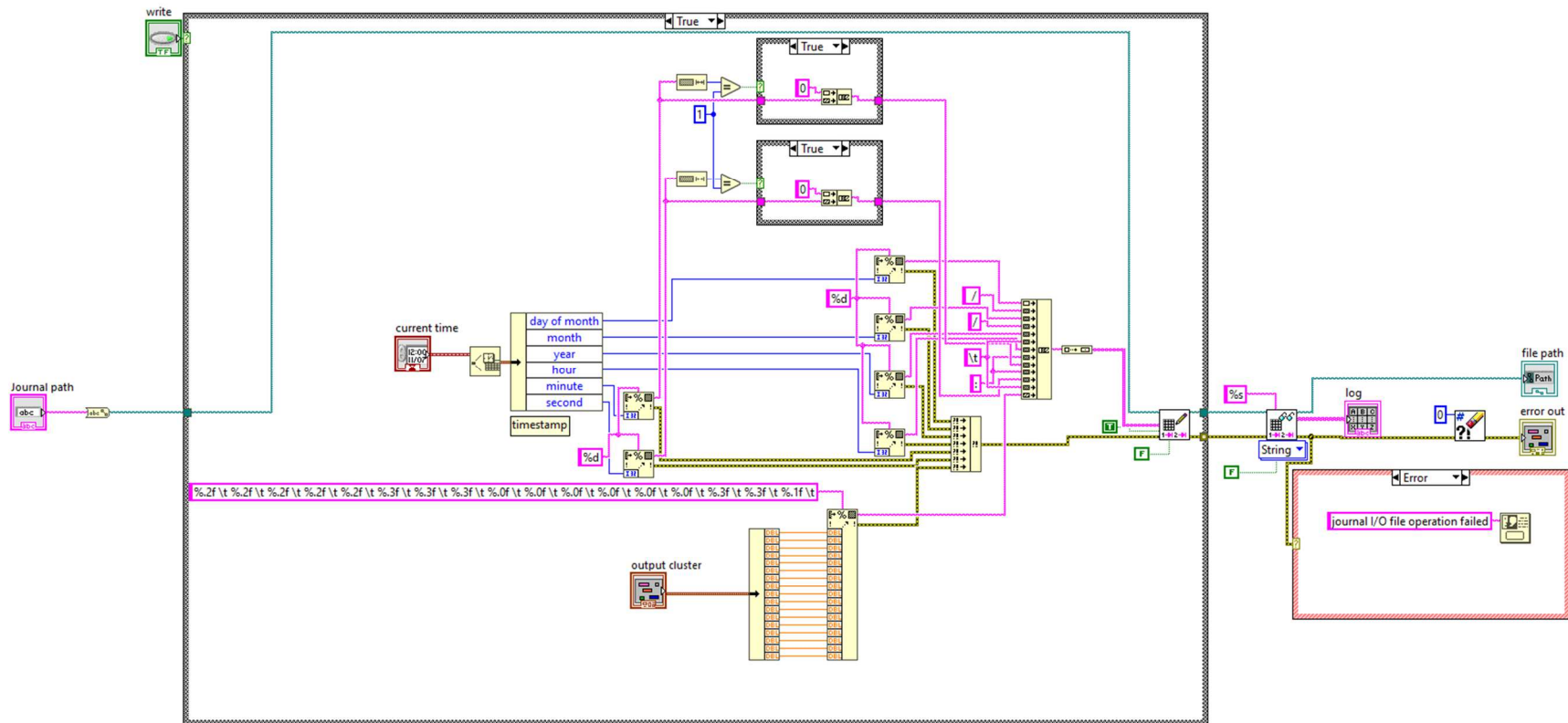
Zde je možnost vidět otevřené 16 kanálové testovací spektrum, každý graf je na sobě nezávislý a je možno používat standardní funkce NI LabVIEW Graph palette jako jsou lupa, kurzory apod. Realizace funkce je založená na nezávislém dědění vlastností subVI v cyklu FOR se zapnutou paralelizací do vláken. Lze se vrátit do hlavní aplikace zpět a pokračovat v práci.

Příloha 11 Program pro testování modulu poruch vyvíjené A.M. Sukhovem pro DGFRS-II

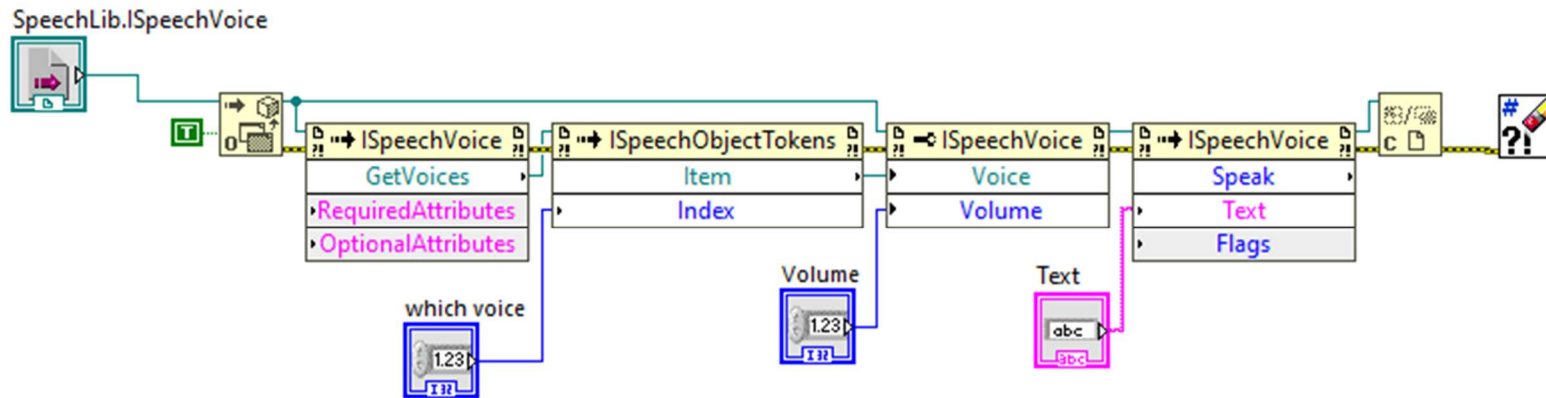


Zde je možné vidět realizaci testu na platformě NI LabVIEW a NI CompactRIO pro CAMAC modul poruch separátoru DGFRS-II vyvíjený A.M. Sukhovem. Jedná se o prostý test, kdy je možno vystavit libovolný bit (poruchu) a vidět odezvu na sdrůžovači (matice OR) čtené ze sběrnice CAMAC kontrolérem Wiener CC USB. Tento modul nakonec byl nahrazen autorem práce vyvinutým modulem poruch popsaným v kapitole 6 z důvodu úmrtí autora a tím rozpadu koncepce tohoto řešení uprostřed vývoje subsystému.

Příloha 12 Funkce zápisu denníku měření energie svazku z TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II



Příloha 13 Funkce pro volání Windows API pro čtení hlasem poruch separátoru DGFRS-II



Funkci uvádím pro zajímavost, jelikož stačí zadat text ve formátu string a o zbytek se stará operační systém. Hlasy různých jazyků lze doinstalovat do Windows s pomocí Windows control panel.

Пříloha 14 Prototyp nového vstupního регистра сбёрнице CAMAC KR-005M ve vývoji

*Муравьев И.И., Ли Зу Эж, Кудин Иван Иванович,
Петров А., Сидоров В.М., Шишов А.И., Ставский А.А.,
Чуриш И.К.*

JSNR Report 10-8114

*Цифровые блоки в стандарте CAMAC, 1974
разработанные для исследований на микроэлектронике Дубна*

7. ВХОДНОЙ РЕГИСТР КР 005

Ширина блока 17,2 мм.
Блок содержит два 16-разрядных регистра, предназначенных для запоминания информации, поступающей от внешних устройств. Занесение информации в каждый регистр производится внешним управляющим импульсом или по команде с магистрали. Любой сигнал занесения информации образует сигнал L. Сигнал L подается во внешнее устройство. Связь обоих регистров с внешними устройствами осуществляется через общий 36-контактный разъем со следующим распределением контактов:

	Регистр 1	Регистр 2
входы 1 ÷ 16 разрядов	1 ÷ 16	18 ÷ 33
управляющий импульс	17	34
выход сигнала L	35	36

Все сигналы имеют логические уровни ТТЛ, причем наличие сигнала соответствует низкий потенциал.

Управляющие импульсы могут подаваться также через коаксиальные разъемы, они должны иметь амплитуду ~0,8 В на сопротивлении 50 Ом.
Длительность управляющих импульсов ≥ 20 нсек.
Поступающая информация заносится в триггеры регистра независимо от их предыдущего состояния.
Сигналы I и N закрывают входы управления.
Сигналы Z и C производят сброс регистров и триггеров L, а также включают блокировку сигнала L.

- Для чтения информации используются шины R1 ÷ R16.
Регистру 1 присвоен подадрес A(0), регистру 2 - A(1).
Регистры выполняют следующие команды с магистрали:
- NA(0,1) F(0) - чтение содержимого регистра и сброс триггера L. Q=1
 - NA(0,1) F(2) - чтение и сброс содержимого регистра и сброс триггера L. Q=1
 - NA(0,1) F(8) - проверка наличия сигнала L. Q=L
 - NA(0,1) F(9) - сброс регистра и триггера L. Q=0
 - NA(0,1) F(10) - сброс триггера L. Q=L
 - NA(0,1) F(24) - блокировка сигнала L. Q=0
 - NA(0,1) F(26) - разблокировка сигнала L. Q=0
 - NA(0,1) F(28) - запись информации в регистр. Q=0
- При выполнении перечисленных команд подается сигнал X=1
Потребляемый ток: 0,5 А по цепи +6 В; 80 мА по цепи -6 В.

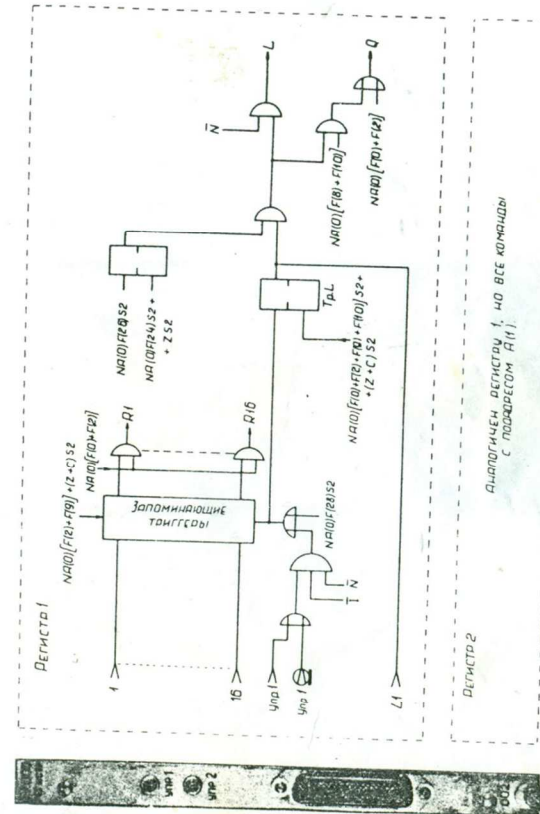
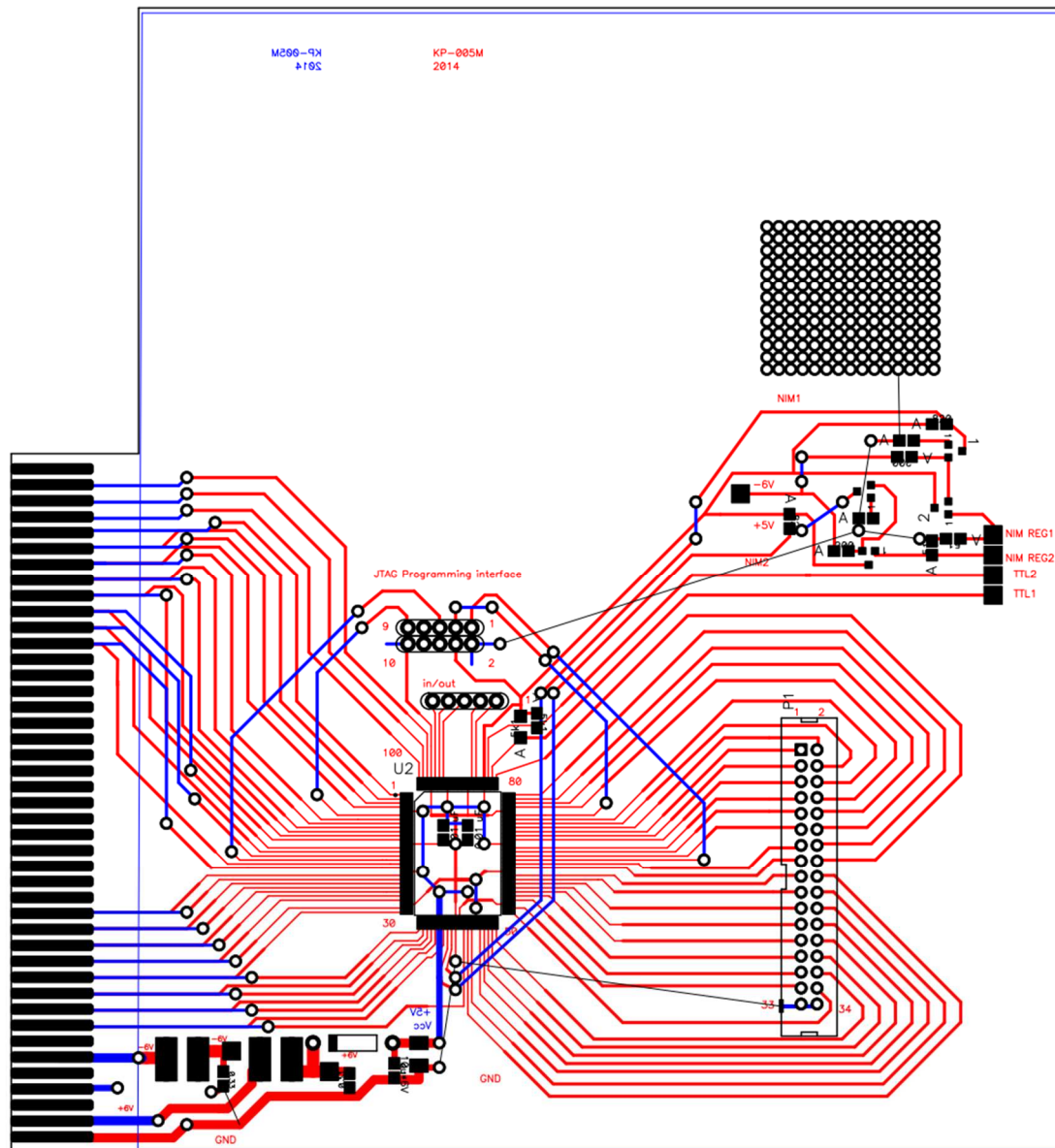


Рис. 7. Передняя панель и блок-схема входного регистра КР 005.

Realizace prototypu vstupního registru KR-005M na CPLD Intel MAX7000S. Schémata původního modulu a realizace na bázi Intel CPLD lze na vyžádání dodat. Obecný popis funkcí vstupního registru sběrnice CAMAC KR-005 z roku 1974 je popsán na předchozí straně.



Příloha 15 Diagnostická aplikace pro test pozičního detekčního systému přiletu částice do DSSD

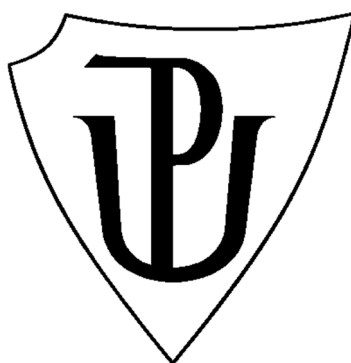
The screenshot displays the 'Viener ccUSB camac spectrum reader' software interface. The main window contains several control panels and a data visualization area. At the top, there are input fields for 'Controller address' (set to CC0350) and 'number of spec channels' (set to 16). A 'number of bins' field is set to 4096. A 'Coder test mode?' section includes a 'STATE bits' panel with radio buttons for 'Coinc STRIPS', 'WORK & strip 0', and 'Coinc BLOCKS', along with three 'EXT in LEMO TTL neg' options. A prominent green 'RUN' button is located in the center-right. To the right of the 'RUN' button is a 'delay after read' slider set to 0 ms and a 'Subadress to show' list with radio buttons for subaddresses 0 through 15, plus an 'All' option. Below these controls is a large plot with 'Strip number' on the x-axis (ranging from 0 to 4200) and a y-axis with values 0, 1000, 2000, 3000, and 4270. The plot area is mostly dark with a few scattered blue data points. Below the plot is a 'Table' section with a row of 16 zeros and a 'DSP -> elements to process' field set to 0. At the bottom, there is a table with the following columns: 'Event no', 'Time', 'bin', 'Strips coinc', 'WORK', 'Block coinc', 'ext1', 'ext2', and 'ext3'. The table is currently empty. On the right side of the interface, there are several control buttons: 'Clear this', 'Clear all', 'Pause', 'EXIT', 'cursors', '16 ch spectras', and 'Save As'.

Tato aplikace na bázi NI LabVIEW a kontroléru sběrnice CAMAC Wiener CC USB byla vytvořena pro diagnostiku a test vyvíjeného subsystému pro měření pozice přiletu částice na DSSSD ze zadních 128 proužků detektoru. Každá registrovaná částice (event) je zapsán do tabulky včetně příznaku koincidence atp. Aplikace je napsaná univerzálně a škálovatelně pro různé šířky sběrnice čtené karty. Pro různé vstupní registry atd. V důsledku se jedná o příkazy standardu N(A)F() CAMAC na moderním kontroléru s pomocí LabVIEW knihoven.

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra experimentální fyziky



Autoreferát disertační práce

Systémy pro řízení a sběr dat při syntéze supertěžkých prvků na stanovištích plynových separátorů DGFRS-I a DGFRS-II v SÚJV Dubna.

Autor:	Mgr. Leo Schlattauer
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Aplikovaná fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Rok:	2020

Abstrakt

Disertační práce mapuje vývoj a nasazení nového, plynem naplněného separátoru Dubna Gas-Filled Recoil Separator II (DGFRS-II) do provozu v Laboratoři jaderných reakcí Spojeného ústavu jaderných výzkumů (SÚJV) v Dubně, Ruská federace. Jedná se o experimenty, kde pomocí jaderné fúzní reakce dochází k syntéze nových nepoznaných izotopů. Autor práce předkládá několik podsystémů vytvořených na míru pro nové experimentální pracoviště. Součástí práce je i zhodnocení výsledků naměřených parametrů separátoru na základě testových reakcí s různými druhy ionů (Ca, Ar) a různými druhy terčů (Yb, Pb, Er) v závislosti na podmínkách v separátoru. V době tisku této práce představují tyto výsledky dosud nepublikovaná experimentální data.

Abstract

This dissertation thesis is following commissioning of the new Dubna Gas-filled Recoil Separator II (DGFRS-II) in Flerov Laboratory of Nuclear Reactions Joint Institute for Nuclear Research Dubna Russian federation. Main principle is based on using cold fusion reactions for producing new isotopes of unknown elements. This work will provide detailed description of new on site developed subsystems for this experimental facility. Overall DGFRS-II performance and test reactions will be also mentioned for different ions (Ca, Ar) and different target materials (Yb, Pb, Er). This is also dependent on separator settings as well. Results and discussion are fresh in some cases unpublished experimental data actual to the date of this work.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D. a pod odborným dohledem přímo na pracovišti A.A. Voinova a Dr. V.K. Utyonkova z SÚJV Dubna. Prohlašuji, že jsem uvedl všechny odborné a literární zdroje a dodržoval zásady vědecké etiky.

.....

Podpis autora

Student: Mgr. Leo Schlattauer
Katedra experimentální fyziky,
Univerzita Palackého v Olomouci, Česká republika

Školitel: Doc. RNDr. Jiří Pechoušek, Ph.D.
Katedra experimentální fyziky,
Univerzita Palackého v Olomouci, Česká Republika

Oponenti: doc. Ing. Ivan Štekl, CSc.
Ústav technické a experimentální fyziky
České vysoké učení technické v Praze, Česká republika

Ing. Ján Kliman, Dr.Sc.
Fyzikální ústav,
Akademie věd Slovenské republiky, Bratislava, Slovenská republika

Datum a místo obhajoby disertační práce:

.....
.....

Obsah

1. Úvod	5
1.1) Výsledky z provedeného experimentu $^{48}\text{Ca}+^{240}\text{Pu}$ v letech 2016-2017	10
2. Systém měření energie svazku z urychlovače	11
2.1) Nová technická realizace TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II.....	13
2.2) Výměna dat a reálná data	14
2.3) Vyvinutý SW + NI webserver + LV DSC + integrace do celku	15
3. Spektrometrie na DGFRS-II.....	18
4. Monitorovací a řídicí systém DGFRS-II	23
5. Systém havarijního vypnutí DGFRS-II	27
6. DGFRS-II první testy, výsledky srovnání charakteristiky	29
Závěr.....	31
Diskuze	32
Výpis publikací autora	33
Použité zdroje.....	34

1. Úvod

Experimenty zaměřené na úplné fúzní reakce s pomocí urychlených ionů ^{40}Ar , ^{48}Ca , ^{50}Ti dopadajících na terč z ^{92}U až po ^{98}Cf vyústily v objev šesti nových prvků periodické tabulky s protonovým číslem $Z=113$ až $Z=118$, které patří do předpovězené oblasti tzv. ostrova stability s využitím Dubněnského plynem naplněného separátoru, dále jen DGFRS-I, a urychlovače U-400 [1,2,3,5,6]. Dalším krokem při objevování nových supertěžkých prvků bylo vytvoření experimentálního pracoviště nazvaného továrna na supertěžké prvky „[Super Heavy Elements Factory](#)“. Toto pracoviště se skládá z nového cyklotronu DC-280 a nového plynového separátoru DGFRS-II [3,4]. Projektovaná luminozita svazku z cyklotronu DC-280 je desetkrát vyšší¹ než doposud používaný cyklotron U-400 ve Flerovově laboratoři jaderných reakcí, dále jen FLNR, který se používal pro přípravu urychlených ionů pro objevy prvků s $Z=113$ až 118. Nový plynový separátor DGFRS-II má taktéž vyšší separační účinnost a dále lepší transmisivitu pro syntetizovaná supertěžká jádra. Díky této unikátní kombinaci je možné přistoupit k experimentům s fúzní reakcí a k přípravě teoreticky předpovězených prvků se $Z=119$ a $Z=120$. Toho bude dosaženo bombardováním terčů z ^{249}Bk a $^{249-251}\text{Cf}$ pomocí urychlených ionů ^{50}Ti i přes velmi nízký účinný průřez² (fb). [1,4]. Na obrázku 1 je fotografie sestaveného separátoru DGFRS-II uvedeného do provozu 9/2019 a připojeného k urychlovači DC-280 ve FLNR.



Obrázek 1 Sestavený separátor DGFRS-II. Montáž a systémová integrace v letech 2018-2020.

¹V případě urychlovače částic U-400 intenzita svazku urychlených ionů ^{48}Ca dosahuje až $7 \cdot 10^{12}$ pps.

V případě urychlovače částic DC-280 intenzita svazku urychlených ionů ^{48}Ca dosahuje až $5 \cdot 10^{13}$ pps.

²Z uvedených zdrojů pro představu například syntéza $Z=115$ (2003) DGFRS-I $2,7_{-1,6}^{+4,8}$ pb.

Princip fungování plynového separátoru DGFRS-I i DGFRS-II je založený na separaci výsledných produktů jaderné reakce v magnetickém poli a plynu. Syntéza supertěžkých prvků probíhá zjednodušeně tak, že urychlené iony z urychlovače v ideálním případě penetrují Coulombovou bariérou jádra terče. Pokud by byla energie ionů vstupujících do reakce příliš vysoká, složené jádro by nevydrželo. V ideálním případě dojde k úplné jaderné fúzi a vyrazení takového výsledného produktu z materiálu terče při ztrátě několika neutronů. Při tomto jevu se protonová a neutronová čísla sčítají a dostáváme mateřské jádro [1]. Účinné průřezy takovýchto reakcí se pohybují na úrovni pb až fb. Proto je při ozařování potřeba co nejvíce vybrat pouze reálná mateřská jádra vzniklá za terčem vstupující do objemu separátoru a co nejvíce potlačit štěpné produkty a výsledky jiných interakcí. Trajektorie nabitých částic pohybujících se od terče k detektoru je závislá na směru a intenzitě stacionárního magnetického pole a v případě, že prostor separačního magnetu je naplněn plynem, tak i na druhu použitého plynu a jeho tlaku. Dále hlavní separační dipól má výstupní trajektorii zalomenou pod úhlem a tím pádem nenabitě částice budou pohlceny interakcí s materiálem nebo budou pokračovat skrze materiál dále, nicméně mimo výstupní okénko a nevstoupí do detekčního systému. To ve výsledku zajišťuje nižší radiační zátěž detektorové komory i o několik řádů a snižuje nežádoucí pozadí zatěžující spektrometrické systémy. Nastavení intenzity magnetického pole zaostřovacích prvků a výběr pracovního plynu a jeho tlaku³ se vybírá tak, aby docházelo k co největšímu průchodu žádoucích prvků reakce, a magnetické čočky se zaostřují tak, aby veškeré žádoucí dopadající částice dopadly do plochy detektoru. Zde je využito spektrometrie na bázi křemíkových proužkových detektorů, dále jen DSSSD⁴. U těchto detektorů každý proužek představuje jeden spektrometrický kanál. Proužky jsou zepředu i zezadu detektoru na sebe kolmé a po fyzické implantaci jádra do povrchové vrstvy křemíku se z výstupních signálů dá určit poloha (souřadnice), čas dopadu a energie emitovaného záření. Křemík je vhodný pro svoje rozlišení okolo 30 keV FWHM⁵ a velký rozsah měření, zde 300 keV až 250 MeV bez nutnosti kryogeniky, jako například u High Purity Germanium (HPGe) detektorů.

³ Ustálené tlaky pracovního plynu se obvykle pohybují mezi 50 Pa až 300 Pa. Běžně okolo 100 Pa [1,2].

⁴ Oboustranný křemíkový proužkový detektor z anglického DSSSD (Double sided silicon strip detector). Detektor zhotovila firma Micron model BB17 obsahující 48 předních a 128 zadních aktivních proužků.

⁵ FWHM z anglického Full Width at Half Maximum značí běžně využívanou charakteristiku rozlišení spektrometrického řetězce nebo detektoru záření. Definována je jako pološířka spektrálního fotopíku v polovině jeho maxima vyjádřená v intervalu energie.

Kolem tohoto detektoru se nachází doplňkové bokové detektory. Pro vyšší geometrickou účinnost detekce právě implantovaných rozpadajících se mateřských jader, které se mohou teoreticky rozpadat do 4π prostoru, a pro časové korelace, které jsou schopny rozlišit nově implantovaná jádra od starých dlouhodobě žijících implantovaných jader, je těsně před detekční komorou umístěna proporcionální drátková komora.

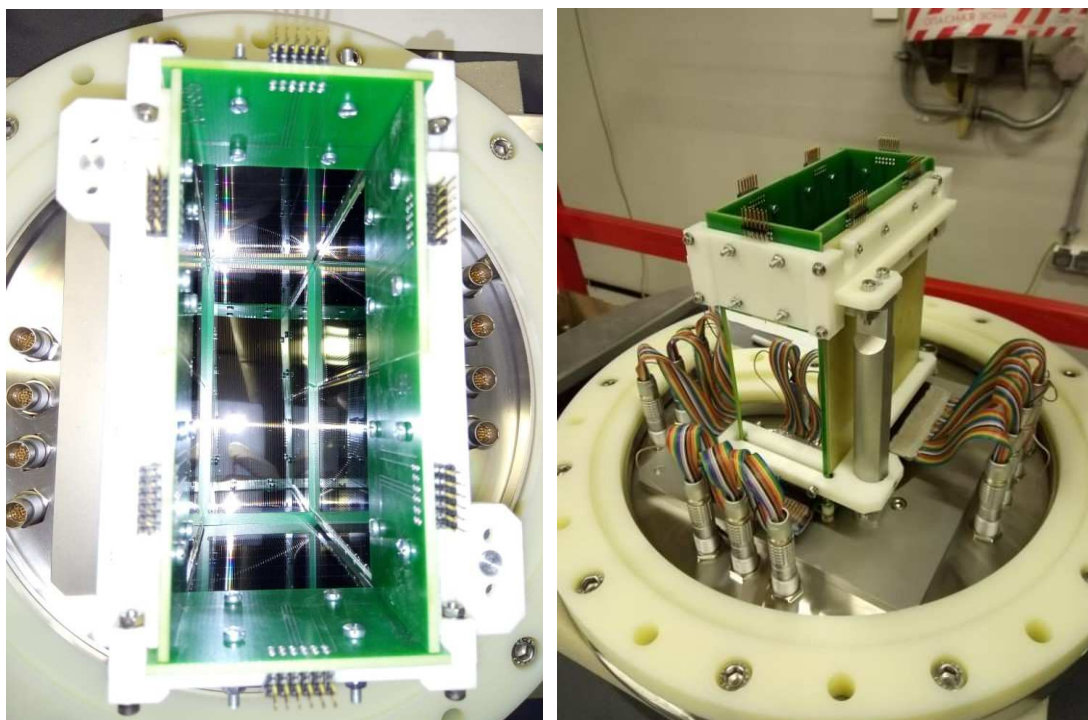
Běžící separátor DGFRS-I i DGFRS-II vyžaduje v pracovním režimu regulace průtoku plynu vodíku či helia definovaného tlaku pomocí PID regulace⁶. Dále se musí separátně zajišťovat potřebný tlak vzduchu v systému pro ovládání elektro-pneumatických aktuátorů oddělujících pracovní sekce v případě spouštění do provozu, havárie či výměně dílů a průtok vody v systému pro chlazení magnetů, turbomolekulárních vývěv a systému napájecích zdrojů.

Pro správnou funkci proporcionální drátkové komory zmíněné výše je zde zajištěn průtok pentanu definovaného tlaku pomocí PID regulace v detekční komoře. Objem komory s pracovním plynem pentanu i vodíku je oddělen okénkem z mylarové folie o plošné hustotě $0,2 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Čerpání objemů je provedeno sekčními suchými vývěvami a sekčními turbomolekulárními vývěvami pro dosažení počátečního vakua pro vyčištění separátoru před naplněním plynem nebo jeho záměnou. Tyto vývěvy dosáhnou vysokého vakua běžně o stupni 10^{-7} Torr až 10^{-8} Torr. Posléze je objem separátoru naplněn pracovním plynem obvykle se jedná o vodík nebo helium o tlaku okolo 1 Torr [1,2,4,6]. Jednotka Torr⁷ je dále využívána ve všech operátorských panelech a mechanických vakuometrech z důvodu zvyku dané experimentální skupiny. Detekční spektrometrická sestava čítá polovodičový proužkový detektor DSSSD doplněný o bokové detektory, jejichž konstrukci si lze představit jako kvádr bez vrchní stěny, která slouží jako otvor pro přilétající produkty syntézy a zbylá neodseparovaná jádra. Na obrázku 2 je otevřená detekční komora separátoru DGFRS-II, primární detekční část spektrometru.

⁶ PID regulátor patří mezi spojitě regulátory, složený z proporcionální, integrační a derivační části.

⁷ Platí: 1 torr = 1 mm rtuťového sloupce $\approx 133,322 \text{ Pa}$

Přesný převod hodnoty v torrech na hodnotu v pascálech je dán definicí fyzikální atmosféry (též zvané standardní atmosféra), která byla původně definována jako 760 mm rtuťového sloupce a na 10. konferenci CGPM byla definována jako $101\,325 \text{ Pa}$, z toho vychází $1 \text{ torr} = 101325/760 \text{ Pa} \approx 133,322\,368 \text{ Pa}$.



Obrázek 2 Konstrukce detekční komory DGFRS-II s detektorem DSSSD (vlevo) a křemíkovými bokovými proužkovými detektory (vpravo).

Metodologie detekce je popsána ve spoluautorském článku⁸ (příloha A). Speciální systém nastavený na práh detekce podle času a energie vyhodnocuje v reálném čase potenciálního kandidáta na supertěžký prvek metodou aktivních korelací, popsaných v uvedené publikaci z přílohy A. Pokud jsou daná kritéria naplněna, spektrometr pošle pokyn systému havarijního vypnutí signálem k zablokování svazku z urychlovače. Tím se zajistí měření bez pozadí způsobeném dopadajícím svazkem z urychlovače a štěpnými produkty vznikajícími při ozařování. Interval je možno definovat podle předpokládané doby detekce očekávané rozpadové řady (minimum 30 s až 5 a více minut). Navíc vyvinutý algoritmus průběžně monitoruje dění na spektrometru a automaticky prodlužuje daný interval přerušování svazku, dokud se nenabere dostatečná statistika (množství detekcí) anebo se signály z rozpadajících jader neztratí v šumu „pozadí“ elektroniky. Posléze je automaticky odblokován svazek na elektrostatickém deflektoru v místě injekce ionů do cyklotronu a experiment pokračuje dále, čekající na další kandidáty. Tyto principy jsou dobře popsány ve

⁸ Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., Schlattauer, L., & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045.

spoluautorských publikacích viz příloha B, příloha C, příloha D. Vývoj systému havarijního vypnutí autorem a jeho nasazení do provozu je uveden v kapitole 5.

Cílem této práce je prezentovat publikaci z úspěšného experimentu syntézy nového detekovaného izotopu ^{285}Fl a jeho příslušné rozpadové řady, na kterém se autor práce spolupodílel, viz kapitola 1.1, a která poskytne i vysvětlení technické realizace daného experimentálního pracoviště. Současně je cílem práce prezentovat nové přístupy v návrhu a realizaci některých podsystémů řízení a sběru dat u obou separátorů DGFRS-I a DGFRS-II. Konkrétně se jedná o autorem této práce navržené nebo spolu navržené podsystémy, které splnily kritéria pro nasazení do dlouhodobého provozu. Pro snadnou dohledatelnost a návaznost na projektové dokumentace a publikované vědecké zdroje jsou části práce ponechány v odpovídajících si jazycích. Toto je zvoleno také z důvodu snadné orientace mezi dokumenty a následnou lehčí dohledatelnost informací navazujících na prezentované celky.

1.1) Výsledky z provedeného experimentu $^{48}\text{Ca}+^{240}\text{Pu}$ v letech 2016-2017

Do této studie autor překládané práce přispěl zejména nasazením nového, vyvinutého systému automatického měření energie svazku urychlených ionů z urychlovače U-400. Měření probíhalo kontinuálně původními elektrodami vzdálenými od sebe 3680mm na stanovišti separátoru DGFRS-I, kde byl experiment prováděn. Systém byl přidán jako redundantní, a výsledky měření a automaticky generovaný elektronický deník byly nakonec použity pro vyhodnocení dat z experimentu, jelikož se ukázaly jako relevantní. Autor práce se aktivně účastnil dále uvedeného experimentu a během přípravy na něj mimo jiné prováděl odladění daného systému. Na následující straně je uvedena spoluautorská publikace výsledků daného experimentu publikovaná v časopise *Physical Review C*. Plný text publikace je uveden v plné verzi disertační práce, zde se nachází abstrakt publikace. Části *I. Introduction* a *II. Experiment* dobře poslouží pro zorientování se v problematice, kterou se zabývá tato práce. Zároveň kapitola *III. Results* popisuje objev nového izotopu flerovia a jeho rozpadové řady a tudíž se jedná o zajímavé výsledky experimentální práce. Uvedený text poslouží jako přehledový článek k problematice syntézy supertěžkých prvků a jejich charakterizaci.

Představení daného systému automatického měření energie urychlených ionů z urychlovače U-400 a DC-280 zmiňovaného výše je v kapitole 2.

PHYSICAL REVIEW C **97**, 014320 (2018)

Neutron-deficient superheavy nuclei obtained in the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction

V. K. Utyonkov,^{1,*} N. T. Brewer,² Yu. Ts. Oganessian,¹ K. P. Rykaczewski,² F. Sh. Abdullin,¹ S. N. Dmitriev,¹ R. K. Grzywacz,^{2,3} M. G. Itkis,¹ K. Miernik,^{2,4} A. N. Polyakov,¹ J. B. Roberto,² R. N. Sagaidak,¹ I. V. Shirokovsky,¹ M. V. Shumeiko,¹ Yu. S. Tsyganov,¹ A. A. Voinov,¹ V. G. Subbotin,¹ A. M. Sukhov,¹ A. V. Karpov,¹ A. G. Popeko,¹ A. V. Sabel'nikov,¹ A. I. Svirikhin,¹ G. K. Vostokin,¹ J. H. Hamilton,⁵ N. D. Kovrizhnykh,¹ L. Schlattauer,^{1,6} M. A. Stoyer,⁷ Z. Gan,⁸ W. X. Huang,⁸ and L. Ma⁸

¹Joint Institute for Nuclear Research, RU-141980 Dubna, Russian Federation

²Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA

³Department of Physics and Astronomy, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee 37996, USA

⁴Faculty of Physics, University of Warsaw, PL-02-093 Warsaw, Poland

⁵Department of Physics and Astronomy, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee 37235, USA

⁶Faculty of Science, Palacký University, CZ-77147 Olomouc, Czech Republic

⁷Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94551, USA

⁸Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China



(Received 8 November 2017; published 30 January 2018)

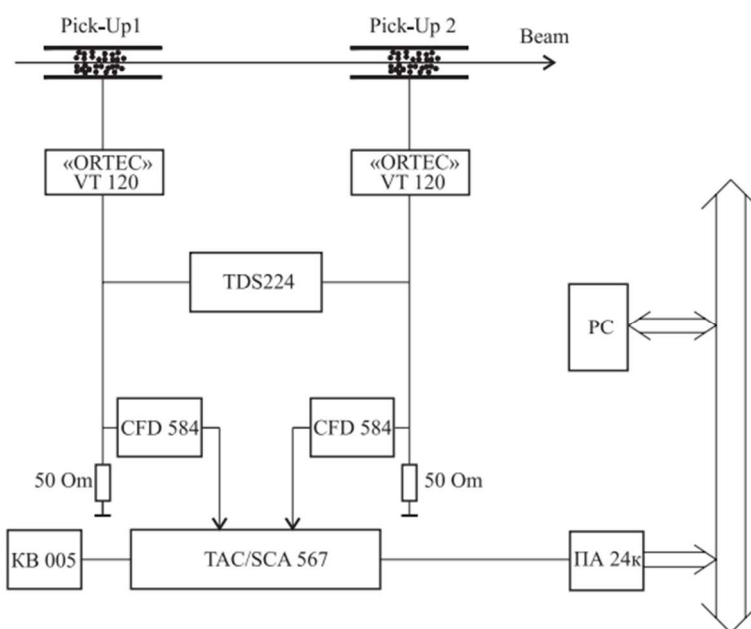
We present new results from investigations of the $^{240}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ reaction at a projectile energy of 250 MeV. Three new decay chains of ^{285}Fl were detected with decay properties mostly consistent with those measured in earlier studies. An additional chain was observed where the nuclei may decay through energy levels different from those of the other six chains registered so far. The cross section of the $^{240}\text{Pu}(^{48}\text{Ca},3n)^{285}\text{Fl}$ reaction was measured to be $0.58^{+0.60}_{-0.33}$ pb, which is a factor of about 4–5 lower than that measured in the previous experiment at 245 MeV beam energy [V. K. Utyonkov *et al.*, *Phys. Rev. C* **92**, 034609 (2015).], consistent with expectations. The origin of an additional chain consisting of a recoil, α particle, and fission event is analyzed. The assignment of 25 short-lived SF events observed in this experiment is also discussed.

DOI: 10.1103/PhysRevC.97.014320

2 System měření energie svazku z urychlovače

Experimentální stanoviště DGFRS-I i DGFRS-II provádí srážkové reakce s fixním terčem a má vlastní měření energie urychlených ionů těsně před dopadem na reakční terč. System měření energie urychlených ionů z urychlovače U-400 probíhá na stanovišti DGFRS-I pomocí dvou elektrod⁹ a podsystemu *doby průletu*¹⁰.

Je zřejmé, že pohybující se iony proletí danou trajektorií za jednotku času. Z času a pevné vzdálenosti mezi elektrodami můžeme vypočítat rychlost, přičemž energie je svázaná s rychlostí. Všechny ostatní veličiny jsou pro daný výpočet konstantou. Iony urychlované na energii v rozsahu 100 MeV až 300 MeV již spadají svou rychlostí do oblasti, kde je třeba použít relativistickou korekci výpočtu. V současné době oba systémy, jak pro urychlovač U-400 stanoviště DGFRS-I, tak i pro urychlovač DC-280 stanoviště DGFRS-II, využívají relativistického výpočtu energie urychlených ionů dopadajících na radioaktivní terč. Pouze technická realizace se liší. V prvním případě pro stanoviště DGFRS-I se jedná o zapojení podle obrázku 3.



Obrázek 3 Schéma systému kontrolního měření energie svazku na stanovišti DGFRS-I

Převzato od Sukhov A.M.

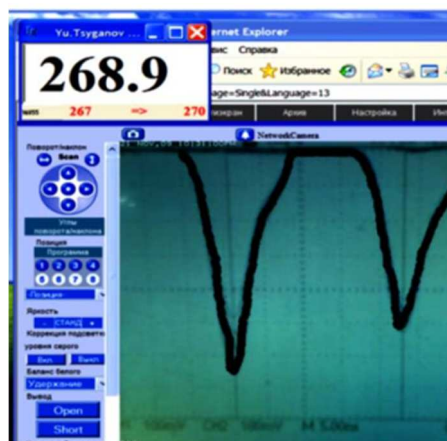
⁹ Elektrody jsou od sebe 3680mm v případě DGFRS-I a 3238mm v případě DGFRS-II.

¹⁰ Dále jen jako zkratka TOF, převzato z anglického Time of Flight

Zde elektrody sbírající náboj vytvoří elektrický impuls zesílený předzesilovači Ortec VT120 na úroveň vhodné k přenosu přenosovou soustavou. Jedná se o řádově milivoly až stovky milivolt při 5 puA z U-400 po zesílení. Tyto signály se poté rozvětví na osciloskop, pro:

- 1) Ruční měření pomocí kursorů a kontrolu kvality svazku pomocí vizualizace časového průběhu signálů z elektrod po předzesílení.
- 2) Moduly využívající metodu *constant fraction discrimination* (Ortec CFD 584 na obrázku 3).

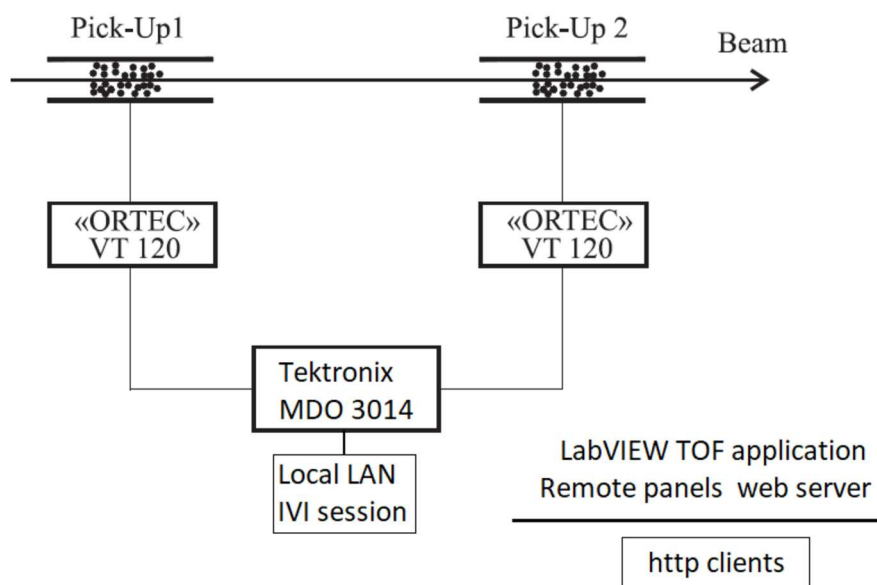
Připravené signály je možno poslat do modulu ORTEC TAC/SCA 567, kde se měří časový rozdíl příchodu náběžných hran signálu. Výsledkem rozdílu je převod času na amplitudu. Jinými slovy, čím větší rozdíl v čase, tím větší amplituda. Výslednou amplitudu převedeme do číslcového tvaru pomocí AD převodníku PA 24k. Ten je společně s kontrolérem sběrnice CAMAC KK-12 připojen k PC, kde dochází k monitorování tvaru signálu pomocí IP kamery připojené do sítě, snímající obrazovku osciloskopu a zároveň uživatelský panel programu, který čte data z AD převodníku PA 24k a počítá dvakrát za sekundu střední hodnotu energie svazku. Videopřenos je též distribuován pro operátora urychlovače U-400, který na základě časového průběhu signálu nastavuje urychlovač pro ideální kvalitu svazku. Vizualizace a uživatelský panel takového řešení je zobrazen na obrázku 4.



Obrázek 4 Automatické měření energie svazku DGFRS-I, původní systém, navrhnuo Sukhov A.M a Tsyganov Y. Ts. převzato od Tsyganov Y. Ts.

2.1) Nová technická realizace TOF pro DGFRS-I a DGFRS-II

Z výše uvedených důvodů byl autorem práce navrhnut systém založený na platformě NI LabVIEW¹¹, využívající stávající infrastrukturu. Změna v hardware byla pouhá záměna starého osciloskopu za modernější digitální Tektronix MDO3014 s podporou vzdálené konfigurace, čtení dat z paměti a ovladači pro programovací jazyk LabVIEW.



Obrázek 5 Navržený podsystém měření energie svazku na DGFRS-II

Z obrázku č. 5 je možno vyzorovat, že základní myšlenka měření energie svazku zůstala zachována. Stále zde využíváme metodu doby průletu (TOF), předzesílení signálů z elektrod pomocí osvědčených rychlých předzesilovačů ORTEC VT 120 a vizualizace časových průběhů signálů pomocí osciloskopu. Zde nicméně došlo k inovaci a záměně osciloskopu za osciloskop s podporou webového rozhraní, vzdáleného řízení, s ovladači konsorcia IVI¹² kompatibilní s NI LabVIEW. Konkrétně se jednalo o osciloskop Tektronix MDO 3014. Tento osciloskop se vzorkovací rychlostí 5 GSa/s má rozhraní USB i Ethernet, přičemž umožňuje plnou vzdálenou konfigurovatelnost, přístup do paměti přístroje na dálku aj. Na této myšlence byl vyvinut prototyp aplikace pro měření energie svazku založený na možnosti

¹¹ NI LabVIEW je vývojové prostředí. Jedná se o grafický software pro návrh aplikací vyžadující testování, měření a řízení. Jedná se o otevřenou SW platformu umožňující jednoduchou integraci systémů třetích stran (zdroje, multimetry, převodníky, atd.). LabVIEW je celosvětovým standardem pro měřicí systémy.

¹² Nadace na sjednocení příkazové sady na řízení přístrojů. Lze přeložit jako záměnný virtuální přístroj z anglického: Interchangeable Virtual Instrument (IVI).

konfigurovat přístroj jak ručně, tak na dálku, a zároveň umožnit výměnu dat mezi osciloskopem, serverem, na kterém běží aplikace pro výpočet a jejími klienty, kterými jsou pult urychlovače a dozorný.

Vzhledem k faktu, že na impuls z elektrody při částici ^{48}Ca i ^{50}Ti připadá přes 100 bodů z AD převodníku osciloskopu¹³ a časový průběh se blíží limitně Gaussově funkci, je zřejmé, že je dodržen vzorkovací teorém. Tento návrh byl autorem této práce zrealizován a úspěšně nasazen do praxe.

2.2) Výměna dat a reálná data

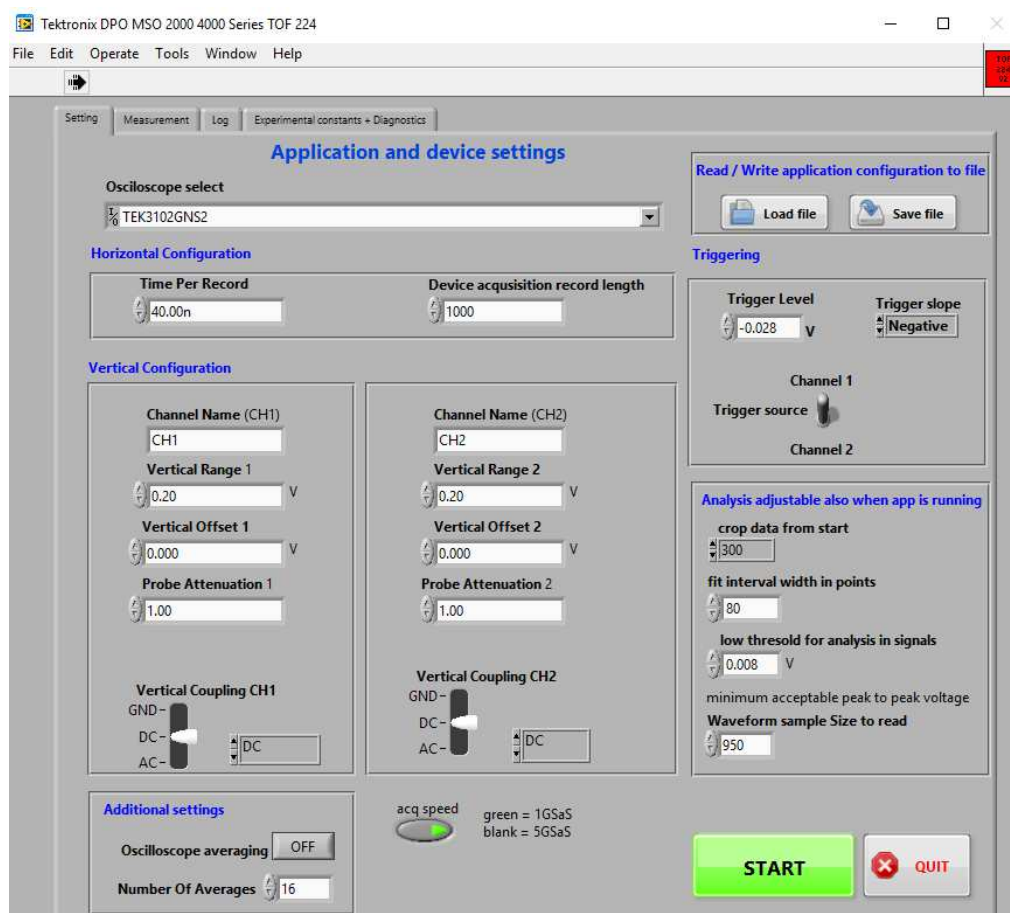
Výměna dat probíhá mezi osciloskopem po síti Ethernet a serverem, na kterém běží NI LabVIEW s aplikací pro měření energie. Ovladač byl využit TKDPO4k, který spadá do NI IVI univerzálních ovladačů pro osciloscipy Tektronix série 3000 a 4000. Ovladač umožňuje pomocí vzdáleného řízení nastavit všechny parametry zpracování signálu, jako jsou nastavení vertikální osy, horizontální osy, průměrování, spouštění a úroveň spouštění apod. Osciloskop je nastaven na 100 000 bodů akvizice, které drží v průběžné FIFO¹⁴ paměti. Tuto paměť v omezené míře pro snížení toku dat a zatížení systému osciloskopu lze přenášet jen z části. Dostatečné by bylo při 5 GSaS brát výřez okolo 500 bodů. Což dává výřez v časové ose cca 100 ns a zatížení sítě včetně redundance pro komunikaci cca 200 kb/s při zajištění bezproblémové odezvy osciloskopu na povely na předním panelu přístroje. Při čtení plné paměti byl uživatelský komfort významně omezen a prodlevy dosahovaly 1 až 3 sekundy. Vzhledem k tomu, že signály ze sběrných elektrod jsou vždy v intervalu 10 ns až 40 ns, tak je při správně nastaveném spouštění osciloskopu zaručeno, že TOF signály jsou vždy v pracovním okně.

¹³ Rychlost AD převodníku je 5 GSaS na straně osciloskopu. Vedení mezi předzesilovačem a osciloskopem je pro obě větve stejné délky a je kompenzováno na odrazy pomocí impedančního přizpůsobení. Tvar signálu je závislý na geometrické konstrukci elektrod a rychlosti přeběhu daného zesilovače VT120. Vzhledem k faktu, že pozorujeme rozdíl času mezi signály, je možné přetvarování zesilovačem zanedbat do té míry, dokud dává jednoznačný signál zpracovatelný dále. Teplotní stabilita zesilovače je řešena temperováním místnosti na stálou teplotu. I při teplotním driftu se předpokládá, že oba signály se změní stejně a výsledný rozdíl minimálních časových průběhů bude stále nula.

¹⁴ Z anglického first in first out – první dovnitř první ven je druh zásobníku dat v tomto případě průběžná paměť, která se plní vzorky z AD převodníku osciloskopu. Ovladač přistupující z vnější sítě do této paměti čte data z dané paměti od nejstarších po nejnovější.

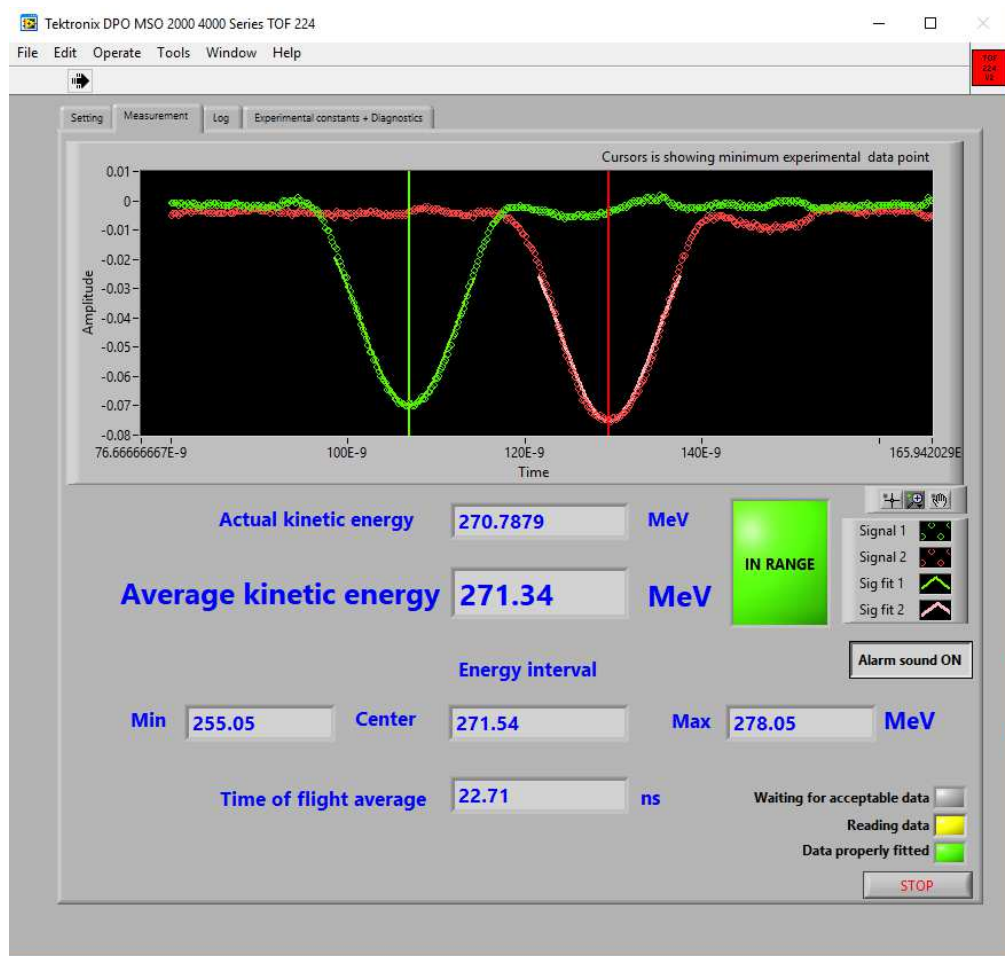
2.3) Vyvinutý SW + NI webserver + LV DSC + integrace do celku

Vyvinuté řešení zahrnuje hlavní aplikaci, která běží na hlavním serveru DGFRS-II pro řízení experimentu. Ten je zároveň zodpovědný za distribuci proměnných (hodnot parametrů) pro řízení celé experimentální haly DGFRS-II i komunikace s klienty (dozorna, pult operátora urychlovače). Výměna dat probíhá za pomoci tzv. sdílených proměnných na bázi NI DSC. Tato aplikace se spouští po startu počítače a zahrnuje možnost upravit vzdálenou konfiguraci osciloskopu po spuštění pro případ změn. Pokud do 3 sekund po spuštění programu nebo serveru uživatel neprovede jakoukoliv akci, program sám zašle osciloskopu vzdálené nastavení a přepne se do režimu měření, kdy očekává platné signály ze sběrných elektrod. Elektronický deník a předávání vypočítaných dat se píše právě tehdy, pokud měřená energie je nenulová. Obrázek 6 znázorňuje čelní panel podsystému pro vzdálené nastavení parametrů osciloskopu.



Obrázek 6 Čelní panel podsystému pro vzdálené nastavení parametrů osciloskopu.

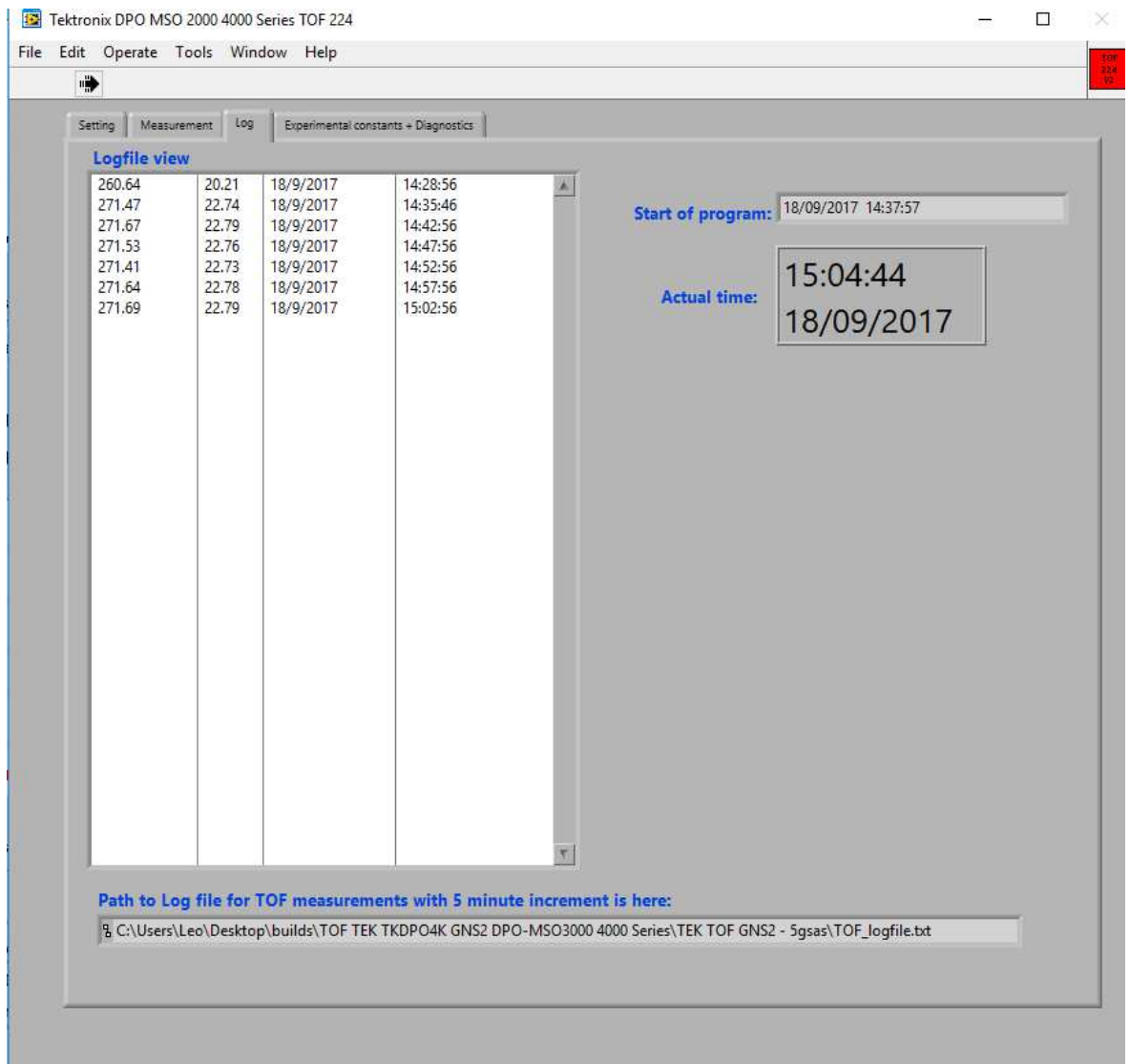
Parametry vzdáleného nastavení osciloskopu podsystému TOF na DGFRS-II jsou čteny po spuštění automaticky z konfiguračního souboru. Tato konfigurační záložka se používá pouze pro změny v konfiguraci. Například pokud se více jak o dva řády změní amplituda signálu vlivem jiných experimentálních požadavků na řádově jinou luminositu svazku z U-400 nebo DC-280. Aplikace v běžném provozním režimu s validními signály, které prošly automatickou inspekcí, je zobrazena na obrázku 7.



Obrázek 7 Čelní panel provozního stavu měření energie svazku TOF na serveru.

Na obrázku 7 vidíme aplikaci za provozu, kde výpočet probíhá kontinuálně (on-line). Při experimentu uvedeném v kapitole 1.1. bylo použito průměrování na straně osciloskopu 8x. Dále byl počítán klouzavý průměr ze sta měření pomocí průběžného FIFO zásobníku naměřených hodnot z osciloskopu. Směrodatná odchylka měření byla ± 1 MeV od ustáleného stavu urychlovače U-400 při energii 250 MeV během 24 h. Kontrolní nezávislé měření spadalo do nejistot vystavení energie svazku přímo na urychlovači U-400.

Dále byla provedena validace aplikace pomocí dvojí kontroly, kde výpočet proběhl odečtením z displeje osciloskopu a dále ručním výpočtem. Validní data zapisuje ve formátu ASCII elektronický deník aplikace a průběžná uložená data je možno za běhu aplikace prohlížet na čelním panelu zobrazeném na obrázku 8.

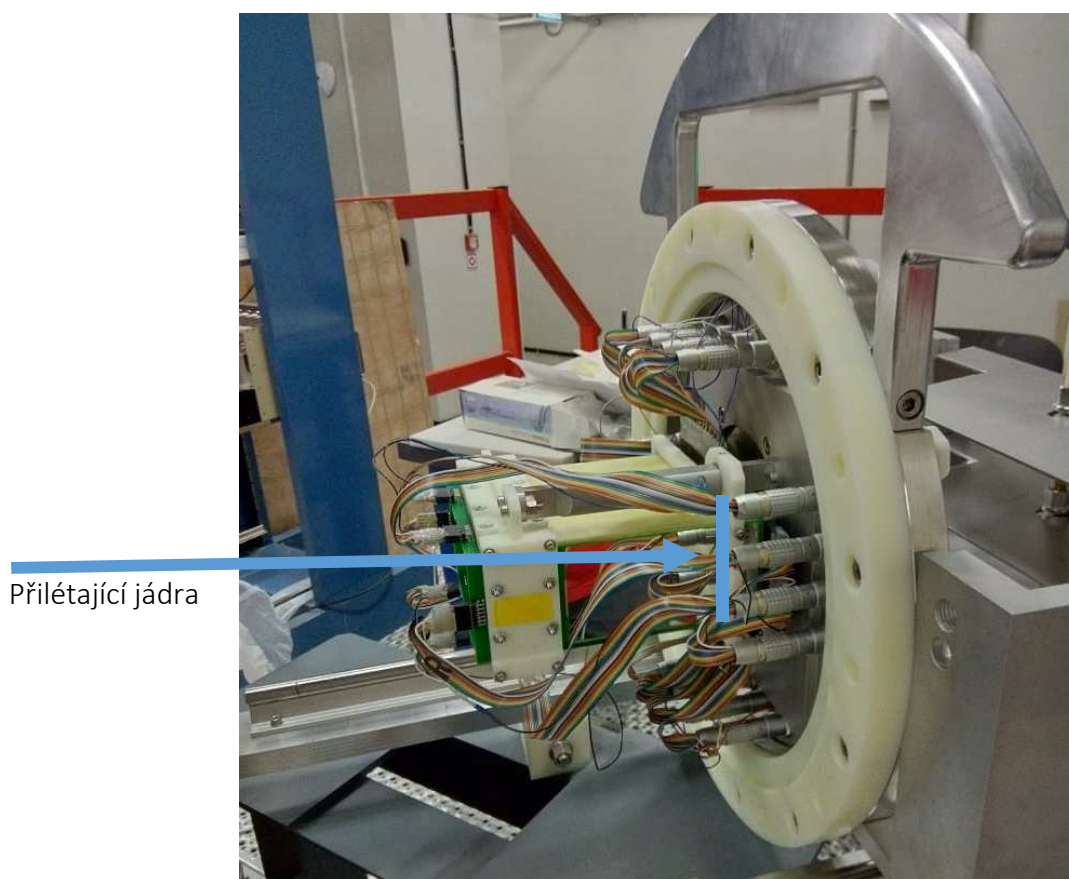


Obrázek 8 Aplikace měření energie svazku - zápis dat.

V zadání projektu bylo provádět zápis dat každých 5 minut. Soubor s deníkem je ve formátu ASCII a obsahuje vše, co je uvedeno v bílém poli tabulky aplikace. Současně se údaj o velikosti energie svazku přenáší do aplikace pro kontrolu parametrů separátoru, kde, pokud daný parametr vyjde z pracovního okna, bude spuštěn vizuální i hlasový alarm. Zároveň je přenášén i tvar signálu pro vizuální kontrolu kvality nastavení urychlovače jak pro potřebu hlavního experimentátora, tak pro operátora urychlovače.

3. Spektrometrie na DGFRS-II

Spektrometrie stanoviště DGFRS-II vychází z 30 let zkušeností se syntézou supertěžkých prvků na DGFRS-I [1,2]. Během let 2017-2019 došlo k zakoupení a realizaci i částečným modifikacím a změnám projektu spektrometrie pro separátor DGFRS-II, který vznikl jako návazný klon spektrometrie DGFRS-I s dílčími inovacemi představenými ve spoluautorských publikacích, viz přílohy A,B,C,D,E a jejich reference. Tato kapitola je zde uvedena pro obecný popis, veškerá odborná data jsou uvedena v daných publikacích anebo budou publikována po ustálení konfigurace všech, jak HW, tak SW, částí řetězce. Detekční spektrometrická sestava čítá polovodičový proužkový detektor DSSSD¹⁵ doplněný o bokové detektory, jejichž konstrukci si můžeme představit jako kvádr bez vrchní stěny (pohled ze strany přilétajících jader viz obrázek 2). Chybějící stěna kvádru slouží jako otvor pro přilétající produkty syntézy a zbylá neodseparovaná jádra. Na obrázku 9 je otevřená detekční komora separátoru DGFRS-II, primární detekční část spektrometru.

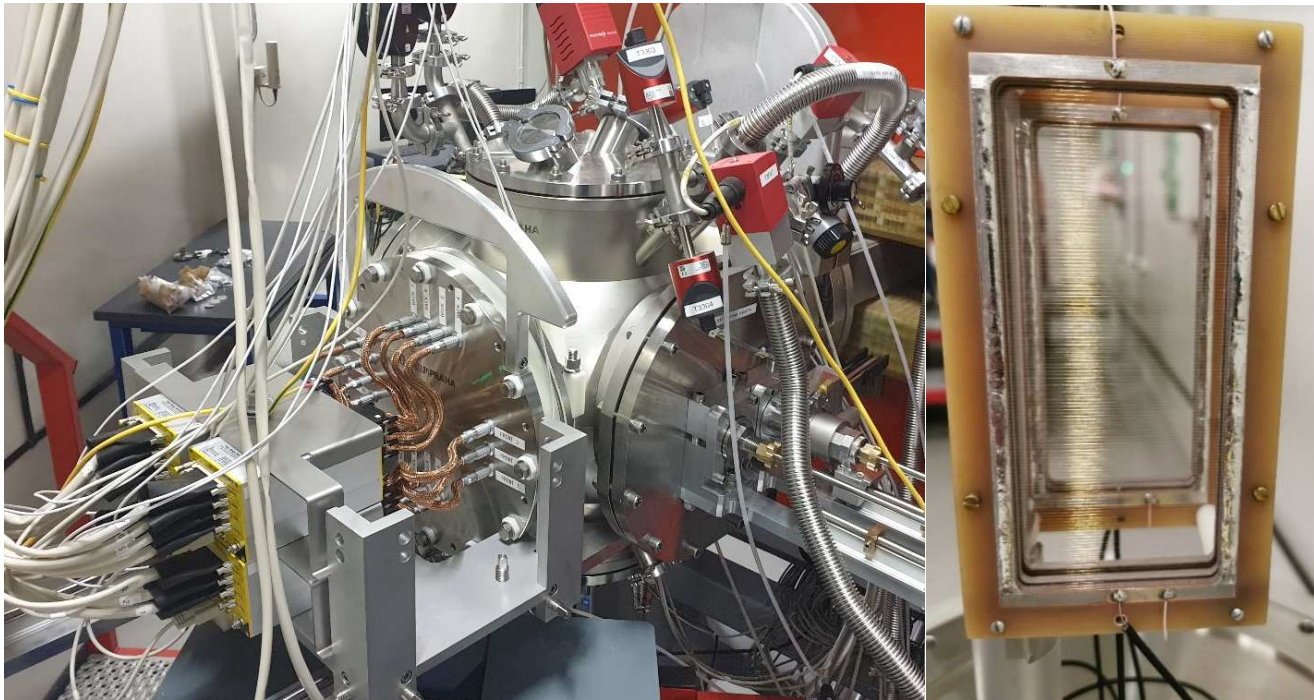


Obrázek 9: Otevřená detekční komora spektrometru DGFRS-II

¹⁵ Micron model BB17 obsahující 48 předních a 128 zadních aktivních proužků. Aktivní plocha detektoru je 47.97 mm × 127.97 mm.

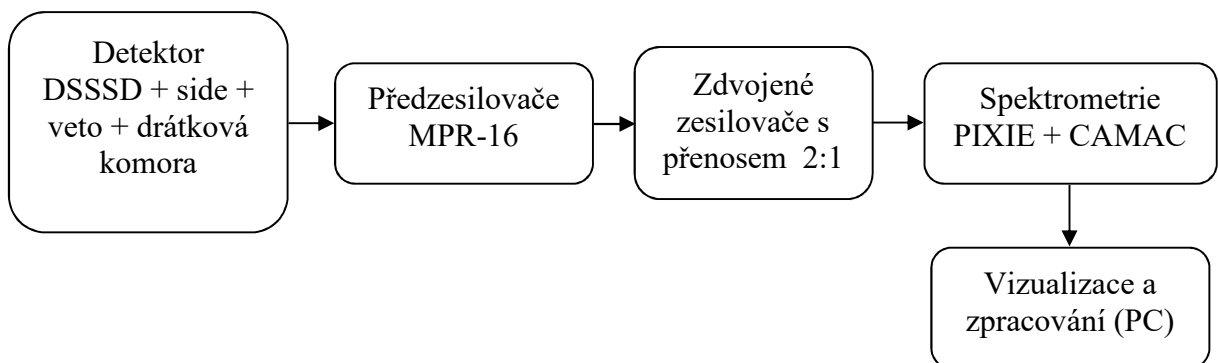
Dále obrázek 10 (vlevo) zobrazuje sestavenou plynotěsnou detekční komoru DGFRS-II rozšířenou o PID regulaci průtoku plynu pro správnou funkci proporcionální drátkové komory. V levém spodním rohu můžeme vidět předzesilovače MESYTEC MPR-16 v konfiguraci výstupů 7 mV/MeV/kanál.

Obrázek 10 (vpravo) představuje realizaci drátkové komory dávající signál dE1 a dE2.



Obrázek 10 Detekční komora DGFRS-II včetně předzesilovačů, PID regulace plynu i proporcionální drátkové komory.

Pro zjednodušení představy zapojení detektorové komory DGFRS-II je uvedeno blokové schéma klíčových prvků na obrázku 11.

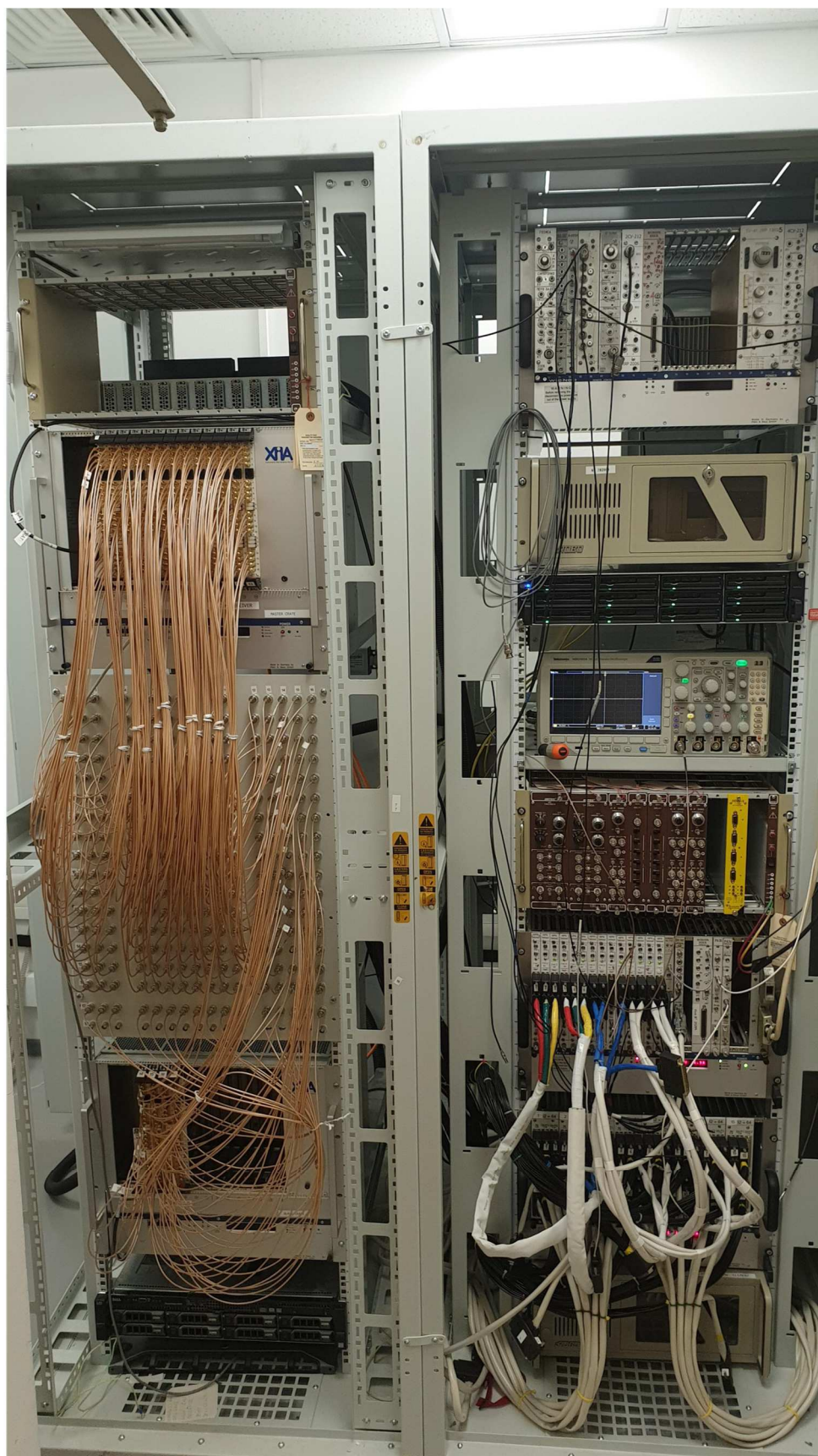


Obrázek 11 Blokové schéma spektrometrického podsystemu.

Systém spektrometrie na bázi digitizérů v průmyslovém standardu PXI, který měl autor této práce na starosti fyzicky sestavit, nakonfigurovat a optimalizovat parametry sběru dat, viz obrázek 12 levý stojan.

Vyvinutý spektrometrický podsystém pracuje při dané konfiguraci s detekcí až 1000 událostí na kanál při rozlišení 30 keV na každý spektrometrický kanál na škále 800 keV až 250 MeV. Celkem je zde 242 spektrometrických signálů. Plus jsou zde dva signály z drátkové komory. Spektrometrie je postavená na ověřených digitizérech na standardu PXI, dříve používaných na DGFRS-I. Zde se jednalo o 13 ks XIA PIXIE-16 100 MSaS/12 bit v jedné PXI skříni. V modernizovaném systému na DGFRS-II jsme se rozhodli zvýšit rozlišení 4× užitím digitizérů XIA PIXIE-16 100 MSaS/14bit. Pro obsluhu detekční komory o 242 kanálech bylo třeba zakoupit a nakonfigurovat 17 ks XIA PIXIE-16 100 MSaS/14bit 16ti kanálových digitizérů ve dvou časově synchronizovaných skříních standardu PXI. Tyto mnohokanálové analyzátory umožňují na úrovni hardware zapnout funkci záznamu časového průběhu signálu na každém žádaném kanále. Je tedy možné zapisovat například ze všech předních proužků DSSD (Micron model [BB17](#)) i časový průběh signálu pro pozdější ruční inspekci potenciálně zajímavých událostí, zatímco na zadních proužcích nás zajímá primárně pozice a energie.

Tím, že proužky jsou v detektoru na sebe kolmé, dostáváme tak protínající se síť a můžeme si posléze vytvořit kartézský systém souřadnic, kam částice přiletěla, kdy a s jakou energií a lze dělat korelace příletu mezi proporcionální drátkovou komorou aj.



Obrázek 12: První implementace plné funkcionality spektrometrie DGFRS-II.

Na obrázku 12 vpravo je systém ve standardu CAMAC postavený na digitizérech ADP-16 firmy Tekhinvest. Tento úsek je zodpovědný za metodu aktivních korelací a tudíž v on-line režimu řídí blokaci urychlených ionů z urychlovače DC-280. Níže se nachází dvojné zesilovače spektrometrických signálů (obrázek 12 pravý stojan první skříň zespodu) pro identickou distribuci každého spektrometrického kanálu do obou elektronik. Tyto aktivní dvojné zesilovače s přenosem 2 jsou vlastní výroby, které pod vedení A. Voinova byly navrženy a vyrobeny na našem pracovišti. Autor této práce je pomáhal testovat a posléze byla spolu s týmem oživena celá spektrometrie.

Výhoda tohoto „duálního“ zapojení je vzájemná kontrola naměřených dat: Tudíž zvýšení redundance, různé osoby provozující analýzu dat, jiné algoritmy i HW implementace¹⁶. Navíc elektronika na bázi CAMAC v současné době vydává signál blokující urychlené iony z urychlovače DC-280 v případě, že je metodou aktivních korelací zjištěna přítomnost kandidáta na supertěžký prvek, viz spoluautorská publikace¹⁷ (příloha A). Blokování svazku je zpracováno přes systém havarijního vypnutí (kapitola 6) a dále předáno na elektrostatický deflektor na stupni injekce urychlovače DC-280.

Spektrometrii na DGFRS-I a DGFRS-II jsou dále věnovány spoluautorské publikace [\[9\]](#), [\[10\]](#), [\[11\]](#), [\[12\]](#) a návazné články, viz reference daných publikací.

¹⁶ Jiný úhel pohledu na realizaci spektrometrického řetězce DGFRS-II nabízí spoluautorská publikace příloha E.

¹⁷ Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., **Schlattauer, L.**, & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045.
<https://doi.org/10.1134/S1063779618060035>

4. Monitorovací a řídicí systém DGFRS-II

Jednotný řídicí a kontrolní systém technologických parametrů DGFRS-II je navržen jako víceúrovňový systém na bázi NI LabVIEW. Tím je díky své architektuře vždy schopen zajistit automatizované uvedení do bezpečného stavu v případě poruch na elektrické síti nebo na straně klienta či serveru. Pro klíčové systémy jako jsou systémy uzavírání pneumatických ventilů nebo bezpečnostních sekcí bylo zvoleno redundantní řízení stavovou logikou za pomoci relé. Takový systém pracuje nezávisle na výpadku počítačové sítě nebo jakékoliv poruchy ze strany PC a zajišťuje uvedení separátoru do konzistentního bezpečného stavu.

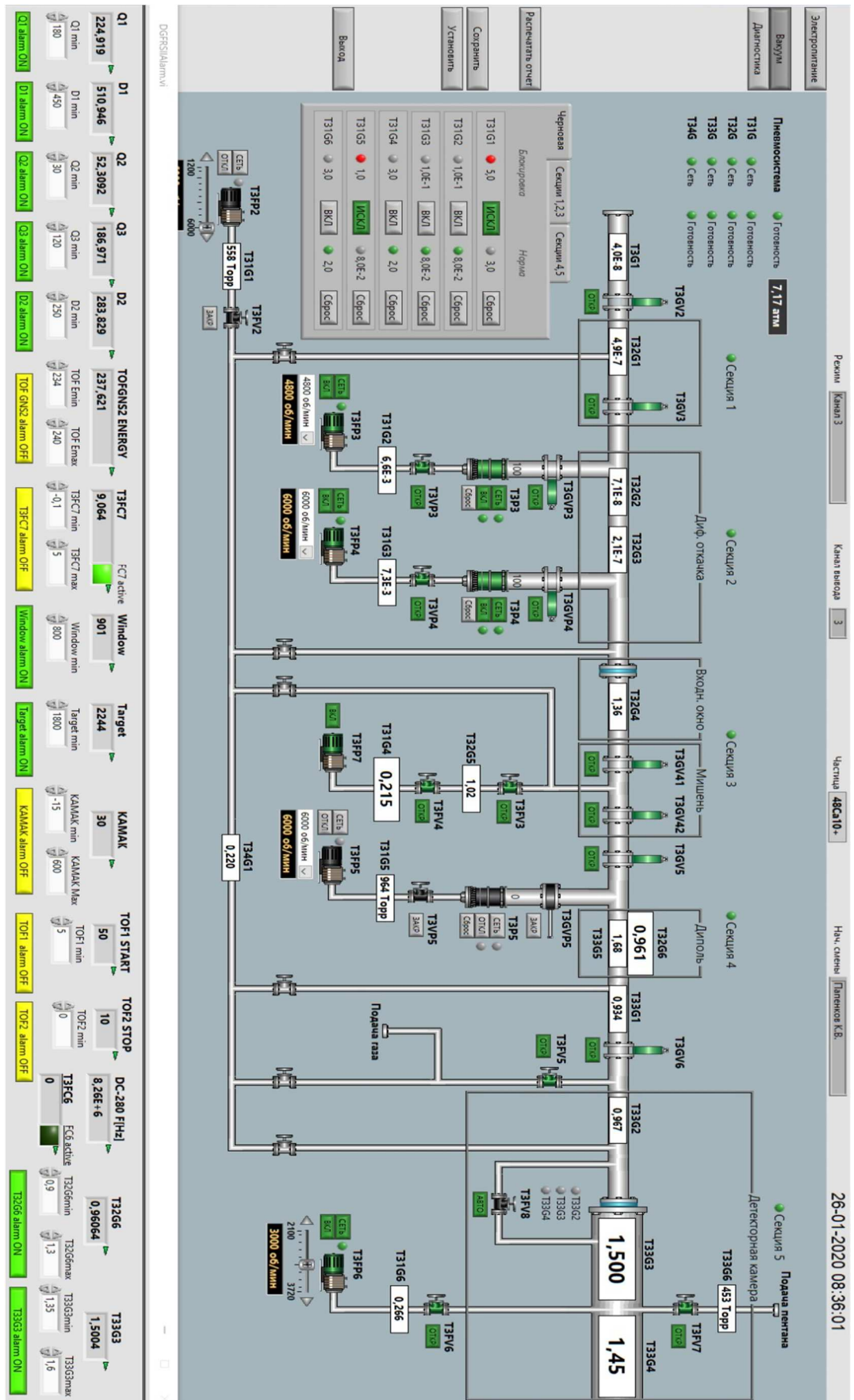
Pult operátora řídicího všechny technologické parametry separátoru DGFRS-II během experimentu vyjma PID regulace průtoku vodíku v hlavním objemu separátoru zobrazuje obrázek 13 a obrázek 14.

Obrázek 13 představuje pult řízení vakua a bezpečnostních sekcí DGFRS-II a byl vyvinut ve spolupráci se skupinou automatizace FLNR pod vedením Pashchenko S.V. Systém pro poplachy a elektronický deník vyvinutý autorem práce je ve spodní části obrázku.

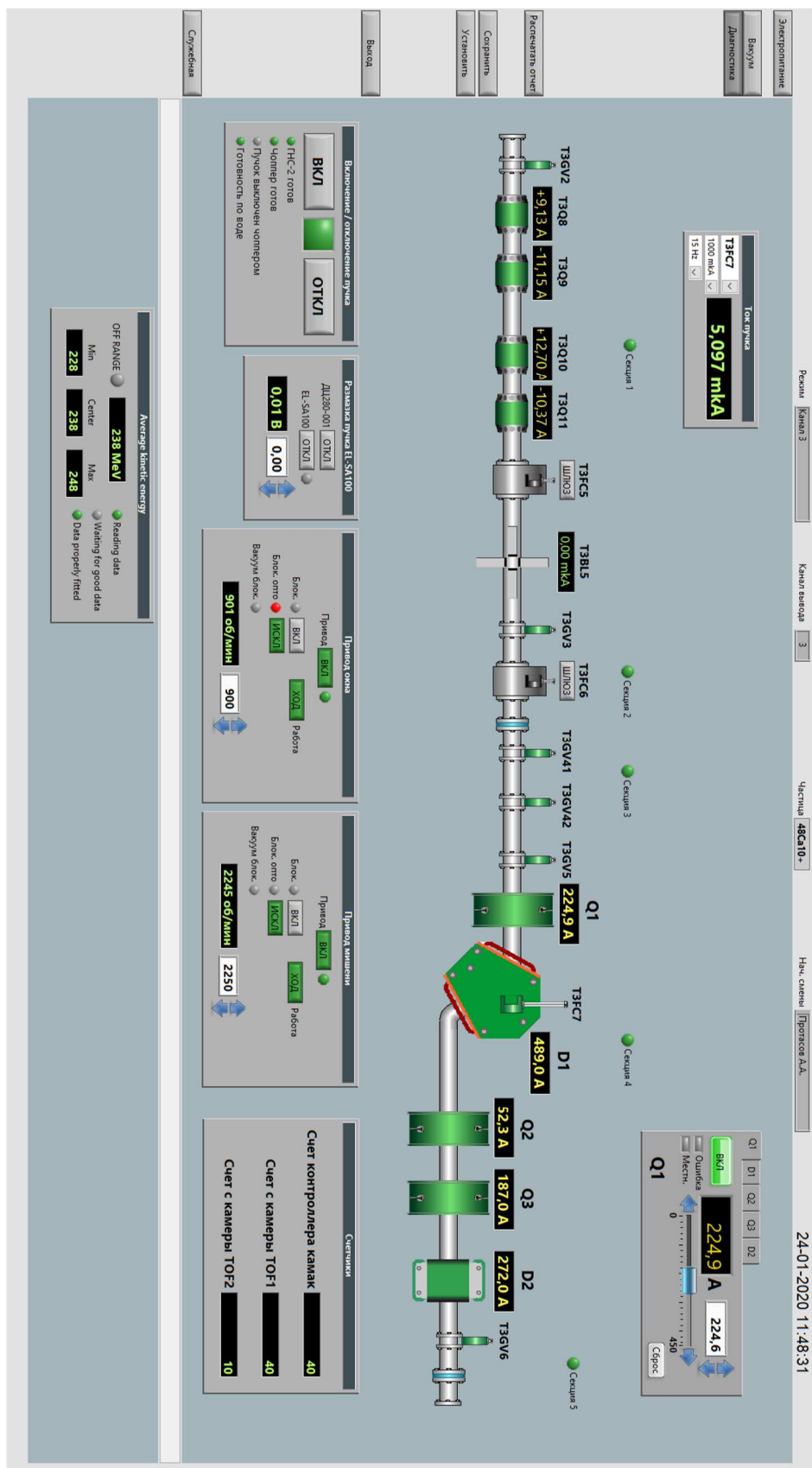
Obrázek 14 představuje pult řízení technologických parametrů a experimentu na stanovišti DGFRS-II. Realizováno skupinou automatizace FLNR pod vedením Pashchenko S.V. V levé spodní části je možné vidět klienta měření energie svazku cyklotronu a řízení experimentu pomocí bloku havarijního vypnutí, viz Kapitola 6. Obojí navrženo autorem této práce.

Oba pulty z obrázků 13 i 14 představují klienty serveru DGFRS_Host, který distribuuje všechny proměnné mezi operátorem experimentu, jednotlivými technologiemi, místnostmi, operátorem urychlovače DC-280, webovým klientem určeným pro dohled, nikoliv řízení, ze sítě internet.

Projektová dokumentace systému řízení technologií DGFRS-II je interním dokumentem laboratoře, která čítá okolo 1400 stran vytvořená na míru skupinou automatizace FLNR pod vedením Pashchenko S.V. Se skupinou automatizace autor práce po dobu vývoje a ožívání úzce spolupracoval. Se souhlasem jsou uvedeny nutné části pro základní pochopení problematiky, např. nutné pro kapitolu 6. Systém havarijního vypnutí navržený autorem.

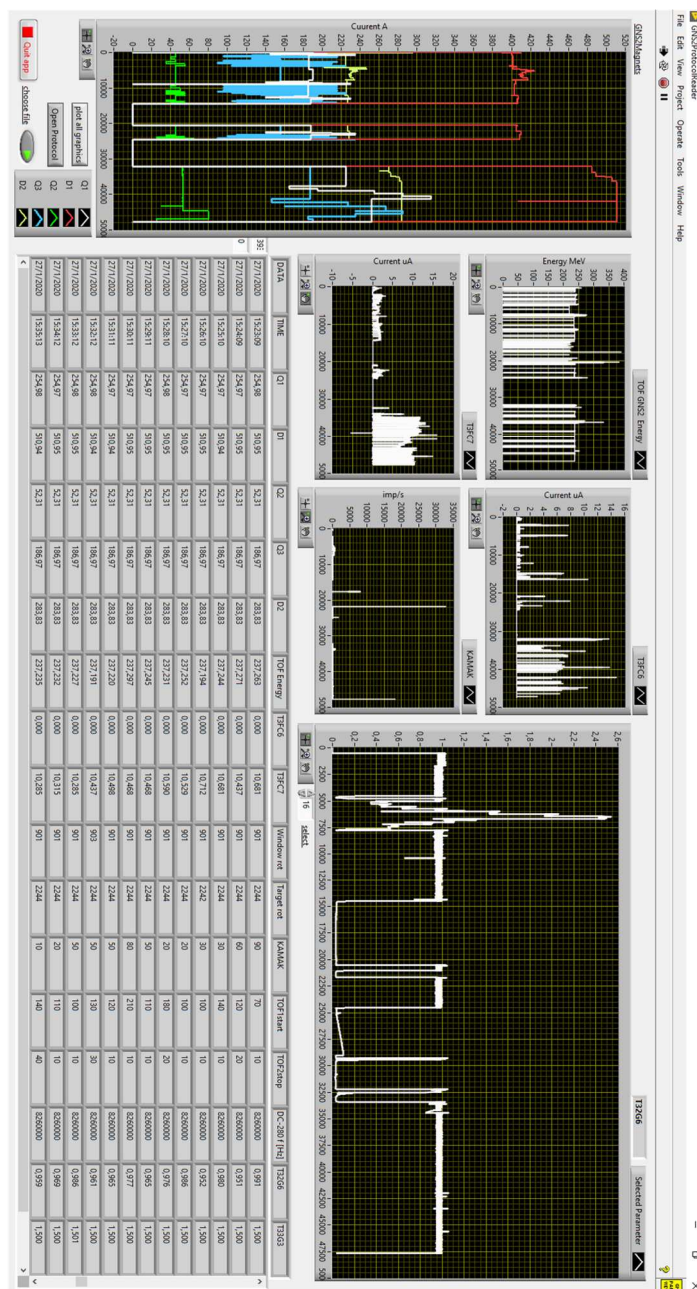


Obrázek 13 Pult řízení vakua a bezpečnostních sekci. Systém pro popluchy a elektronický deník vyvinutý autorem práce je ve spodní části obrázku.



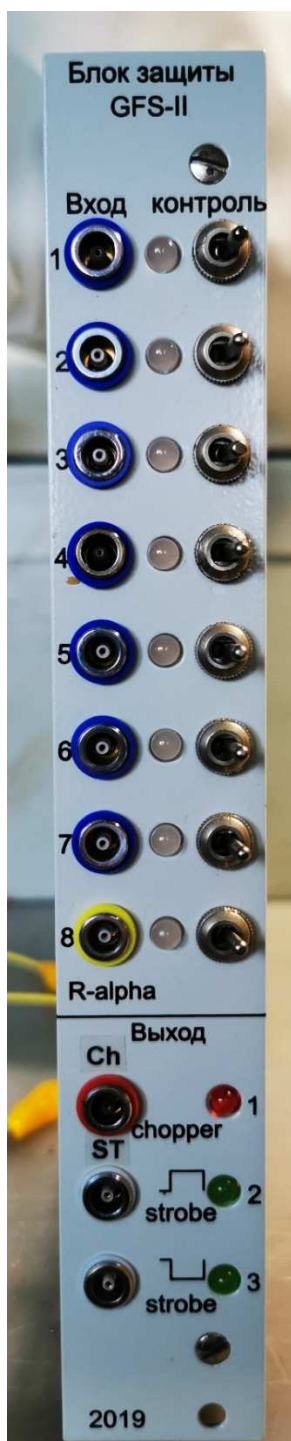
Obrázek 14 Pult řízení technologických parametrů a experimentu. V levé spodní části je možné vidět klienta měření energie svazku cyklotronu a řízení experimentu pomocí bloku havarijního vypnutí, viz Kapitola 6. Obojí navrženo autorem této práce.

Ze všech 17 klíčových parametrů separátoru DGFRS-II se píše každou minutu (nebo jiný zvolený interval) elektronický deník ve formátu ASCII navržený autorem práce. Součástí bylo dodání i jednoduché aplikace, která umožňuje číst daný formát a vizualizovat historická data separátoru. První verzi takové aplikace zachycuje obrázek 15. Aplikace umí načíst ze serveru automaticky aktuální pracovní sadu dat a vizualizovat je. Lze zde přepínat ve velkém grafu zvolený parametr a zobrazit jej. Zároveň jsou některé hlavní parametry vždy fixně zobrazeny. Aplikace je vhodná pro získání přehledu, například co se stalo za poslední 3 hodiny, v minulé směně apod. Pro vyhodnocení dat z experimentu se potom používají data z přehledně strukturovaného ASCII textového souboru.



Obrázek 15 Vizualizace deníku parametrů DGFRS-II navrženo autorem práce.

5. Systém havarijního vypnutí DGFRS-II



Obrázek 16. Navržený blok Ochrany DGFRS-II

Vyvinutý modul ochrany DGFRS-II zajišťuje sdružení signálů poruch separátoru na úrovni HW prvků bez SW či FW. Jedná se o syntetizovanou TTL logiku na bázi Intel CPLD, kde na vnitřních spojích daných logických celků jsou buňky EEPROM. Modul funguje nezávisle v momentě přítomnosti napájení a sdružuje sedm různých poruch separátoru na matici OR a dává příkaz elektrostatickému deflektoru na stupni injekce ionů do cyklotronu DC-280.

Poruchy jsou zejména neočekávané (číslováno podle vstupů):

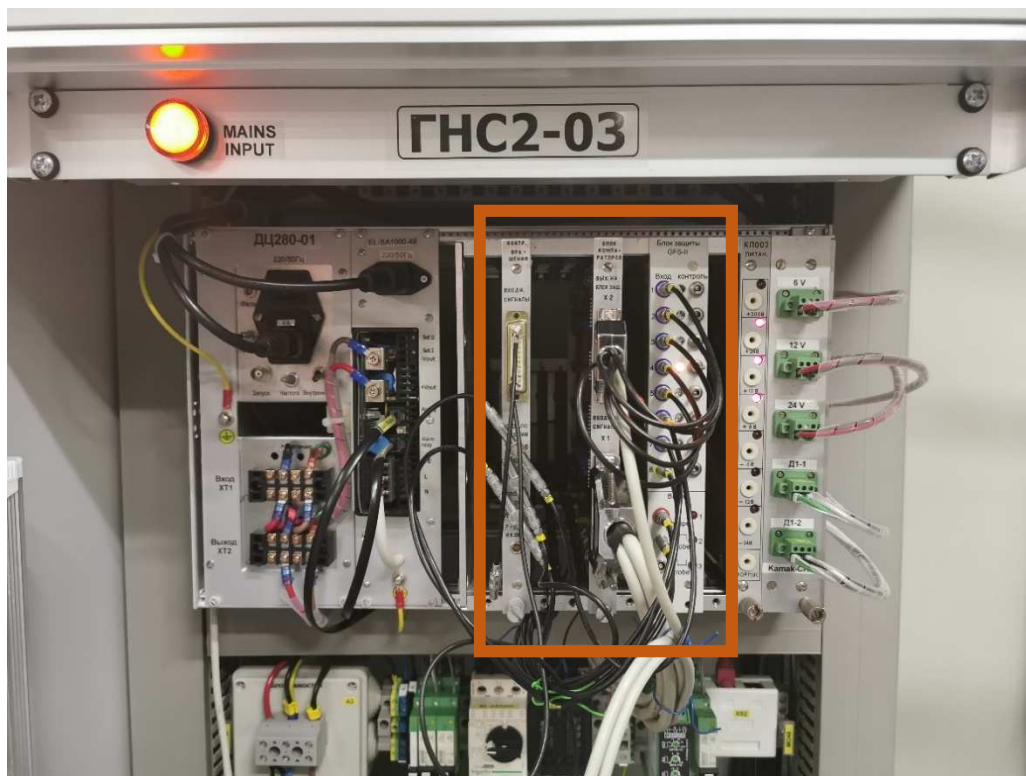
- 1) Poklesy proudu na hlavním separačním dipólu (modul komparátorů), hlavní měřicí větve.
- 2) Poklesy proudu na hlavním separačním dipólu, záložní měřicí větve.
- 3) Poklesy otáček radioaktivního terče, hlavní měřicí větve (modul komparátorů).
- 4) Poklesy otáček radioaktivního terče, záložní měřicí větve. Optozávora na disku terče (modul otáčení).
- 5) Poklesy otáček vstupního okna, hlavní měřicí větve (modul komparátorů).
- 6) Poklesy otáček vstupního okna, záložní měřicí větve (modul otáčení).
- 7) Poklesy proudu deflektoru svazku, „rozmasky“ (modul komparátorů).

Vzniklými poruchami se do několika ms přeruší tok svazku z urychlovače DC-280 na separátor DGFRS-II.

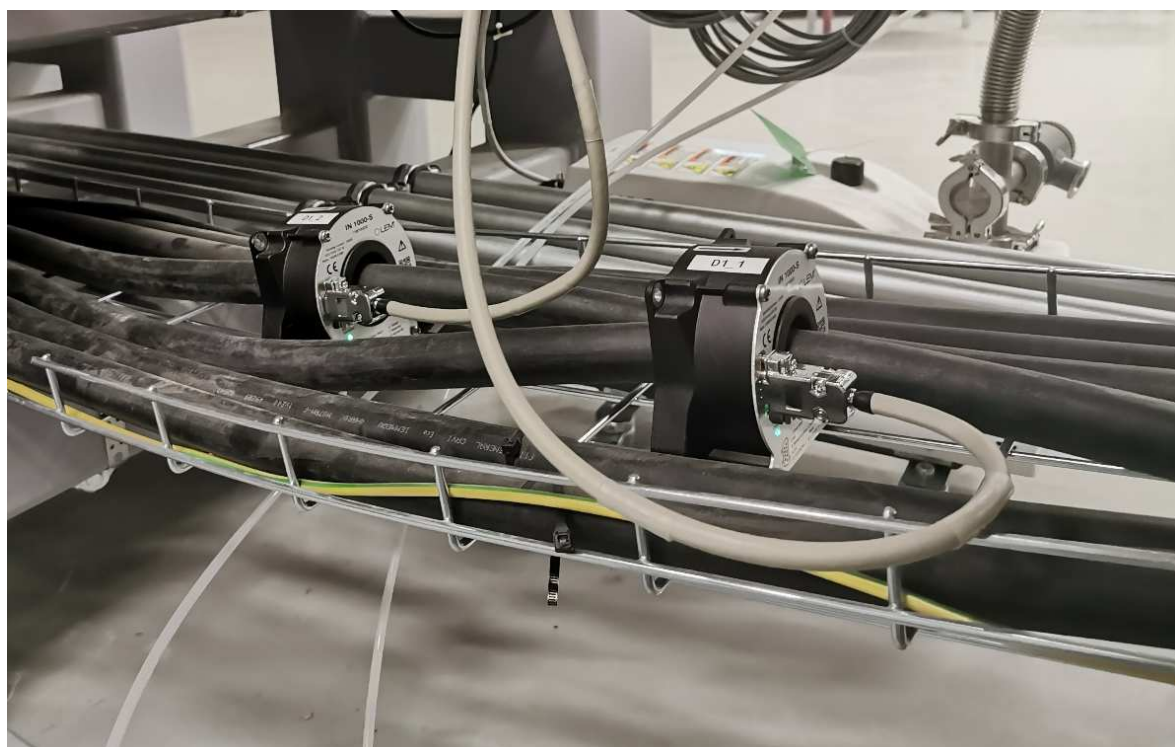
Osmý vstup je vyhrazen pro odstávku svazku na základě metody aktivních korelací z CAMAC spektrometru pro zajištění měření rozpadových řad bez pozadí ze svazku z cyklotronu. Tento osmý vstup je připojen na výstupy STROBE přes detektor sestupné hrany s přetvarováním na 100 ms. Takový signál poté zajišťuje obnovení svazku po ukončení měření rozpadových řad.

V opačném případě bez příchodu STROBE si stavová logika pamatuje poruchu a vše je zastaveno do příchodu operátora, který musí přijmout řešení na základě stavu operátorských panelů vizualizace parametrů DGFRS-II.

Systém havarijního vypnutí zachycují obrázky 16 až 18.



Obrázek 17 Realizace havarijního vypnutí



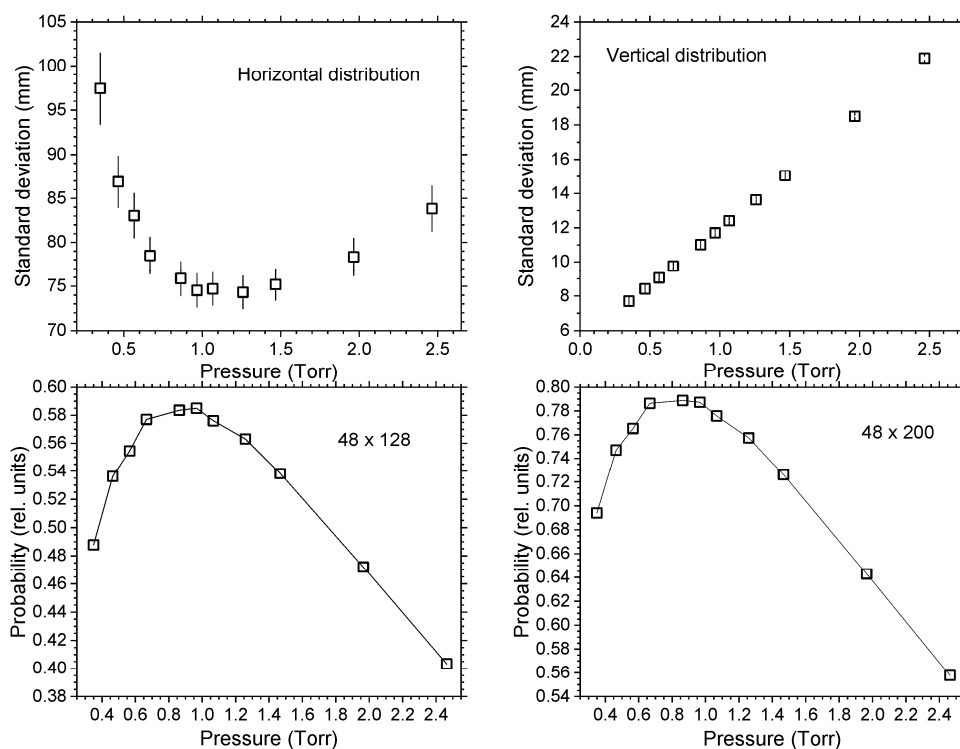
Obrázek 18 Měření proudu hlavního dipólu v rozsahu 0A až 1000A na bázi linearizovaného hallova snímače LEM IN 1000-S. Přesnost měření 0.0018 % z plné škály.

6. DGFRS-II první testy, výsledky srovnání charakteristiky

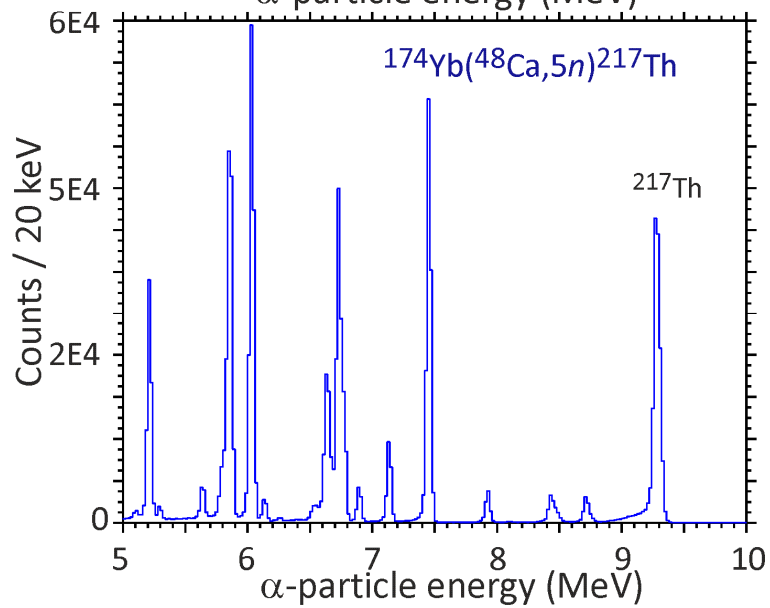
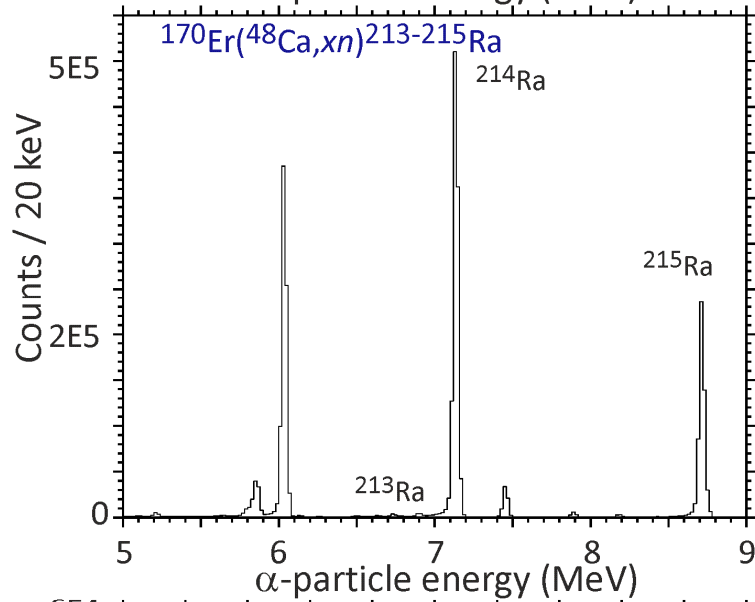
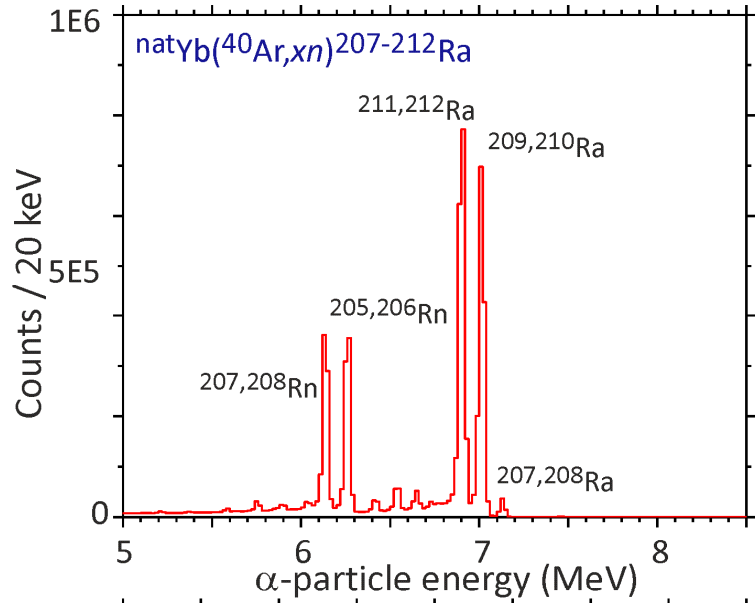
První testy separátoru a nastavení všech elementů probíhalo na reakcích $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{170}\text{Er}$, $^{48}\text{Ca}+\text{Pb}$ pro různé tlaky vodíku i hélia. Veškeré technické prostředky, přístroje a zařízení obstála při 24/7 testech trvajících mezi 8/2019 až 5/2020. Klíčové k datu tisku práce nepublikované výsledky parametrů nového separátoru DGFRS-II uvádím s dovolením autora Utyonkov V.K. v obrázku 19 a 20.

Obrázek 19 vypovídá o nejvyšší účinnosti separátoru DGFRS-II při tlaku provozního plynu vodíku okolo 1 Torr (133 Pa). Toto se potvrdilo při testových reakcích $^{48}\text{Ca}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{170}\text{Er}$, $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Yb}$. Spektra takových reakcí v alfa škále jsou prezentována na obrázku 20 na další straně.

Prezentovaná data, konkrétně obrázek 19 a 20 představují dosud nepublikované výsledky kolektivní práce. Zde uvádím s ústním svolením autora Utyonkova V.K., od kterého autor této práce danou analýzu obdržel.



Obrázek 19 Závislost pravděpodobnosti průchodu produktů syntézy na tlaku v separátoru.



Obrázek 20 Výsledky spektrometrie na alfa škále pro dané reakce.

Závěr

V této práci byly prezentovány výsledky z experimentu jaderné fúzní reakce ionů ^{48}Ca s terčem ^{240}Pu na stanovišti DGFRS-I publikované v časopise Physical Review C.

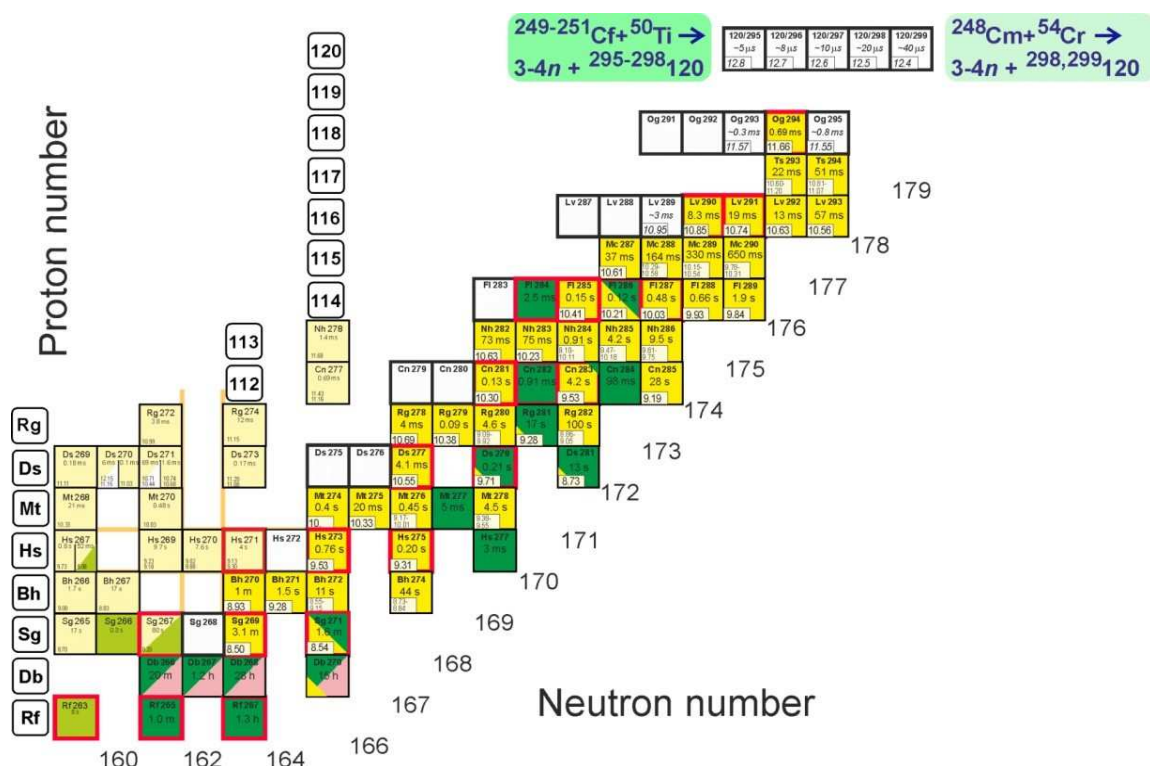
Dále byl kladen důraz na představení podsystémů řízení a sběru dat starého a nového separátoru navrženého autorem:

- Systém pro automatické online měření energie svazku urychlených ionů z urychlovače U-400 i DC-280 využívající metody doby průletu (TOF) byl nasazen za pomoci vyvinutého software na platformě NI LabVIEW, NI DSC, NI IVI, NI web Server.
- Navržený systém nouzového vypnutí v případě poruchy na hlavním dipólu či otáčením radioaktivního terče či okna oddělující vakuum od pracovního plynu byl nasazen do experimentální haly a úspěšně prošel testy na DGFRS-II.
- Systém dohledu vybraných kritických parametrů separátoru byl naprojektován a nasazen na míru v NI LabVIEW. V případě, že daná veličina vyjde ze stanoveného pracovního rozsahu, ozve se hlas, který přečte předem definovaný text poruchy a daná veličina začne blikat červeně. Nasazeno v provozu na DGFRS-II.
- Byl vytvořen elektronický deník v NI LabVIEW, který zapisuje automaticky v nastavených časových intervalech klíčové technologické parametry experimentu. Nasazeno do provozu na DGFRS-II.
- Autorem práce byl sestaven a uveden do provozu systém spektrometrie na bázi digitizérů PXI s rozlišením 30 keV při škále 800 keV až 250 MeV při počtu 242 nezávislých spektrometrických kanálů.
- Autorské a spoluautorské publikace jsou uvedeny plným textem v kapitole 1.1. a v přílohách A až F.
- Autorem spoluvyvíjený hardware a software během stáže v SÚJV je dále prezentován formou příloh 1 až 15 v plném textu práce.

Lze konstatovat, že první testy separátoru a nastavení všech elementů probíhalo na reakcích $^{40}\text{Ar}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{\text{nat}}\text{Yb}$, $^{48}\text{Ca}+^{170}\text{Er}$, $^{48}\text{Ca}+\text{Pb}$ pro různé tlaky vodíku i hélia. Veškeré technické prostředky, přístroje a zařízení obstála při 24/7 testech trvajících mezi 8/2019 až 5/2020.

Diskuze

Na základě výsledků těchto testů se ve fázi úprav nachází detekční systém – zvětšení plochy pro zajištění dopadu všech produktů na detektorovou plochu vzhledem k disperzi na hlavním magnetu a nemožnost jakýmkoliv prostředky zaostřit výsledné produkty do plochy detektoru na ose X. Aktivní plocha detektoru Micron BB17 je v současné době (47,97mm x 127,97mm). Tyto výsledky jsou prozatím interními daty k datu tisku práce. Modifikace čítá zvětšit komoru na (95,94mm x 255.94mm) aktivní plochy. To znamená přidat 140 spektrometrických kanálů do spektrometrie. Úprava konstrukce detektorové komory. Výměna vstupního okna za diferenciální vakuovou soustavu snižující vysoké vakuum urychlovače, které se pohybuje v řádu 10^{-8} Torr na nízké vakuum 10^{-3} Torr pro reakci přímo s terčem. Vstupní okna z Ti folie se ukázala jako nejslabší článek řetězce pro jejich časté propálení svazkem¹⁸, kterému se nedalo nijak zabránit přes veškeré kombinace nastavení experimentálních parametrů. Na obrázku 21 je názorně zobrazený plán budoucích experimentů po modifikaci, které se předpokládají v roce 2021.



Obrázek 21 Plánovaný budoucí experiment po dokončení všech modifikací. Předpokládá se syntéza nového prvku $Z=120$ při reakci $^{249-251}\text{Cf}+^{50}\text{Ti}$. Obrázek získán s dovolením autora Utyonkova V.K.

¹⁸ Doba funkce vstupního okna byla v intervalu (2 až 60) hodin, než došlo k porušení jeho integrity.

Výpis publikací autora

Publikace s IF:

Schlattauer, L., Parali, L., Pechousek, J., Sabikoglu, I., Celiktas, C., Tektas, G., ... Prochazka, V. (2017). Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW-based digital system. *European Journal of Physics*, 38(5). <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa7a7a>

IF: 0,861 (2019) citace: 1

Utyonkov, V. K. and Brewer, N. T. and Oganessian, Yu. Ts. and Rykaczewski, K. P. and Abdullin, F. Sh. and Dmitriev, S. N. and Grzywacz, R. K. and Itkis, M. G. and Miernik, K. and Polyakov, A. N. and Roberto, J. B. and Sagaidak, R. N. and Shirokovsky, I. V. and Shumeiko, M. V. and Tsyganov, Yu. S. and Voinov, A. A. and Subbotin, V. G. and Sukhov, A. M. and Karpov, A. V. and Popeko, A. G. and Sabel'nikov, A. V. and Svirikhin, A. I. and Vostokin, G. K. and Hamilton, J. H. and Kovrizhnykh, N. D. and **Schlattauer, L.** and Stoyer, M. A. and Gan, Z. and Huang, W. X. and Ma, L. (2018). Neutron-deficient superheavy nuclei obtained in the Pu 240 + Ca 48 reaction. *Physical Review C*, 97(1) <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.014320>

IF: 3,240 (2019) citace: 15

Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., **Schlattauer, L.**, & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045. <https://doi.org/10.1134/S1063779618060035>

IF: 0,580 (2019) citace: 3

Další výstupy:

Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Voinov, A. A., Zubarev, A. N., & **Schlattauer, L.** (2016). New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1134/S1547477116050435>

Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., **Schlattauer, L.**, & Voinov, A. A. (2017). Development of the autocalibration system for the DGFRS spectrometer based on the double-sided silicon strip detectors. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/335-339-paper-54.pdf>

Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Voinov, A. A., **Schlattauer, L.**, Shumeiko, M. V., & Barinova, S. V. (2017). An upgraded e-tof- ΔE based spectrometer of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/309-317-paper-50.pdf>

Schlattauer, L., Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Tsyganov, Y. S., & Voinov, A. A. (2017). New particle position determination modules for double sided silicon strip detector at DGFRS. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/265-270-paper-42.pdf>

Použité zdroje

- [1] Yu.Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, Super-heavy element research, Rep. Prog. Phys. **78**, 036301 (2015).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/78/3/036301/pdf>
- [2] Yu.Ts. Oganessian and V.K. Utyonkov, Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions, Nucl. Phys. A **944**, 62 (2015).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947415001517>
- [3] V.I. Zagrebaev, A.V. Karpov, and Walter Greiner, Possibilities for synthesis of new isotopes of superheavy elements in fusion reactions, Phys. Rev. C **85**, 014608 (2012).
<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.85.014608>
- [4] Hofmann, S., Heinz, S., Mann, R. et al. Review of even element super-heavy nuclei and search for element 120. Eur. Phys. J. A **52**, 180 (2016).
<https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16180-4>
- [5] K. Subotic, Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, Yu.V. Lobanov, F.Sh. Abdullin, A.N. Polyakov, Yu.S. Tsyganov, O.V. Ivanov, Evaporation Residue Collection Efficiencies and Position Spectra of the Dubna Gas-filled Recoil Separator, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **481**, 71 (2002).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201013675>
- [6] V.K. Utyonkov, N.T. Brewer, Yu.Ts. Oganessian, K.P. Rykaczewski, F.Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, R.K. Grzywacz, M.G. Itkis, K. Miernik, A.N. Polyakov, J.B. Roberto, R.N. Sagaidak, I.V. Shirokovsky, M.V. Shumeiko, Yu.S. Tsyganov, A.A. Voinov, V.G. Subbotin, A.M. Sukhov, A.V. Sabel'nikov, G.K. Vostokin, J.H. Hamilton, M.A. Stoyer, and S.Y. Strauss. Experiments on the synthesis of superheavy nuclei ^{284}Fl and ^{285}Fl in the $^{239,240}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$ reactions. Physical Review C **92**, 034609 (2015).
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1493143>
- [7] Schlattauer, L., Parali, L., Pechousek, J., Sabikoglu, I., Celiktaş, C., Tektas, G., Procházka, V. (2017). Calibration of gamma-ray detectors using Gaussian photopeak fitting in the multichannel spectra with a LabVIEW-based digital system. *European Journal of Physics*, **38**(5).
<https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa7a7a> (příloha F)

- [8] Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Kazacha, V. I., **Schlattauer, L.**, & Zhang, Z. (2018). Development of the Active Correlation Method: Theoretical-Methodological Aspect. *Z. Zhang*, 49(6), 1036–1045. <https://doi.org/10.1134/S1063779618060035> (příloha A)
- [9] Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Voinov, A. A., Zubarev, A. N., & **Schlattauer, L.** (2016). New analog electronics for the new challenges in the synthesis of superheavy elements. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13(5). <https://doi.org/10.1134/S1547477116050435> (příloha B)
- [10] Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., **Schlattauer, L.**, & Voinov, A. A. (2017). Development of the autocalibration system for the DGFRS spectrometer based on the double-sided silicon strip detectors. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/335-339-paper-54.pdf> (příloha E)
- [11] Tsyganov, Y. S., Polyakov, A. N., Voinov, A. A., **Schlattauer, L.**, Shumeiko, M. V., & Barinova, S. V. (2017). An upgraded e-tof- ΔE based spectrometer of the Dubna Gas-Filled Recoil Separator. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/309-317-paper-50.pdf> (příloha D)
- [12] **Schlattauer, L.**, Subbotin, V. G., Zubareva, A. M., Tsyganov, Y. S., & Voinov, A. A. (2017). New particle position determination modules for double sided silicon strip detector at DGFRS. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 2023). <http://ceur-ws.org/Vol-2023/265-270-paper-42.pdf> (příloha C)
- [13] Sukhov, A.M., Polyakov, A.N. & Tsyganov, Y.S. Parameter monitoring and control system of Dubna Gas-Filled Recoil Separator. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 7, 370–377 (2010). <https://doi.org/10.1134/S1547477110050122>

Návazné zdroje jsou vedeny v dílčích publikacích autora viz příloha A až F a proto zde nejsou uvedeny (dalších 123 zdrojů).