

ТЕХНІКА ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТУ
ENGINEERING AND METHODS OF EXPERIMENT

УДК 539.1.075+539.1.076

<https://doi.org/10.15407/jnpac2024.02.188>

С. Б. Чернишенко*, В. М. Добішук, В. М. Пугач

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: chsb2010@gmail.com

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ RMS-R3
У ТРЕТІЙ СЕРІЇ ФІЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ В ЕКСПЕРИМЕНТІ LHCb^a

Модернізований детектор LHCb забезпечує збір даних у третій серії фізичних вимірювань при миттєвій світності протон-протонних зіткнень до $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ при енергіях до 14 TeV. Ефективне проведення експерименту забезпечують ряд швидкодіючих моніторингових систем, у тому числі система RMS-R3, яка здійснює моніторинг області взаємодії та фону експерименту LHCb (IP-8, ЦЕРН). Важливою функціональною характеристикою цієї системи є спостереження стабільності світності в широкому динамічному діапазоні, який у верхній його межі забезпечує лінійний відгук при десятикратному перевищенні номінальної світності. У цій роботі ілюструється нова функціональна характеристика RMS-R3, яка полягає в її здатності продукувати високоточні дані про локалізацію фізичних подій зіткнень ядер в області взаємодії експерименту. Зокрема, дані, виміряні в 2022 - 2023 рр., дають змогу спостерігати вплив варіації параметра середньої кількості ядро-ядерних взаємодій на один перетин згустків пучків, зміну стану вершинного детектора VELO та інжекції газової мішені SMOG2 для різних газів.

Ключові слова: експеримент LHCb, система моніторингу світності та фону, моніторинг області взаємодії методом асиметрій відгуку системи.

1. Вступ

Система радіаційного моніторингу RMS-R3 – оригінальна інструментальна розробка Інституту ядерних досліджень (ІЯД) НАН України [1], призначена для здійснення безпечної та ефективної роботи нещодавно модернізованого експерименту LHCb [2] (ЦЕРН, Швейцарія). За своєю конструк-

цією (рис. 1). детектор LHCb є форвардним спектрометром загального призначення на Великому адронному колайдері (БАК). Модернізований експеримент дає змогу досліджувати ядро-ядерні зіткнення в широкому діапазоні енергій від $\sim 0,1 \text{ TeV}$ у режимі фіксованої мішені [3] до 14 TeV у режимі колайдера при миттєвих світностях до $\sim 2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.



Рис. 1. Схематичне зображення модернізованого детектора LHCb [2] для нової серії фізичних вимірювань Run-3 з 2022 по 2025 рр. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Зокрема, при модернізації експерименту було встановлено нову систему інжекції газу (SMOG2, [3]). Конструкція системи SMOG2 дає можливість збільшити поверхневу густину газу на кілька порядків і значно розширити кількість інжектіваних

газів (гелію, аргону, ксенону, водню тощо). Енергія зіткнень у режимі фіксованої мішені може бути в діапазоні від 0,07 до 0,115 TeV (у системі центра мас пари нуклонів).

© С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук, В. М. Пугач, 2024

^a Представлено на XXX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 25 - 29 вересня 2023 р.

З метою забезпечення моніторингу області світності експерименту за відомим методом розрахунку асиметрії відгуку її сенсорів [1] детекторні модулі RMS-R3, функціонуючі за принципом металевих фольгових детекторів (МФД) [4], змонтовані симетрично навкруги іонопроводу у вертикальному та горизонтальному напрямках у площині, перпендикулярній до осі пучка ВАК, на відстані $Z = -220$ см від номінальної точки взаємодії LHCb IP8. За принципом дії МФД частота вихідних сигналів детекторів RMS-R3 прямо пропорційна потокам заряджених частинок, що перетинають їхню площину, утворених в області світності пучків ВАК та можливим фоном. Отже, амплітуда відгуку детекторів RMS-R3 прямо пропорційна миттєвій світності експерименту, а асиметрії їхнього відгуку дають змогу монітувати стабільність та відновлюваність умов експерименту, як це ілюструється в наступних розділах статті. Наведені результати отримано у вимірюваннях на ВАК протягом 2022 - 2023 рр. (Run-3).

2. Функціональні характеристики RMS-R3 та застосування методу асиметрій для моніторингу області взаємодії

Для отримання високоточних даних необхідно забезпечити однорідні стабільні умови виконання експерименту протягом усієї кампанії третьої серії фізичних вимірювань (Run-3) з 2022 по 2025 рр. експерименту LHCb. Ці умови експерименту забезпечують спеціально створені швидкодіючі моніторингові системи (PLUME, BCM) включаючи RMS-R3, яка здійснює моніторинг ядерних взаємодій в області взаємодії експерименту IP-8 (LHCb), та фону. Важливою функціональною характеристикою цієї системи є спостереження миттєвої світності експерименту з лінійним відгуком при десятикратному перевищенні номінальної світності тобто, до $1,5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Нижня межа чутливості визначається шумовими характеристиками RMS-R3 і становить величину близько $10^{26} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Спроектована та виготовлена в ІЯД НАН України RMS-R3 надає оперативну інформацію про прийнятні умови зіткнень пучків ВАК або пучка ВАК з ядрами газової мішені в області взаємодії експерименту LHCb. Дані RMS-R3 мають гарантувати, що ці умови добре відтворюються при нових серіях наповнення пучків ВАК.

RMS-R3 створено на основі концепції МФД, що є оригінальною розробкою ІЯД НАН України [4]. Принцип дії МФД базується на явищі вторинної електронної емісії, що виникає при опроміненні їх потоками заряджених частинок. Система має високоякісні функціональні характеристики

[1], використовує автономну систему зчитування даних, яка включає комерційно доступну електроніку.

Геометричне розташування модулів детекторів RMS-R3 було спроектовано таким чином, щоб застосувати метод аналізу даних, відомий як метод асиметрій. Цей метод передбачає розрахунок асиметрії відгуків детекторів «лівий - правий» та «верхній - нижній». Асиметрії розраховуються за формулою (1):

$$\alpha_{ij} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j}, \quad (1)$$

де R_i та R_j – частота відгуку датчиків i та j відповідно, що відповідають парам модулів детекторів. Метод є високопрецизійний, оскільки на площині від -1 до 1 забезпечує спостереження зміщення локалізації фізичних подій відгуку сенсорів на потоки заряджених частинок до $1 \cdot 10^{-3}$ одиниць асиметрії (рис. 2). Для зручності презентації даних позначимо асиметрії для лівого - правого детекторів як $\alpha_{\text{horizontal}}$, а для верхнього - нижнього – α_{vertical} . Ці дані було отримано протягом серії вимірювань в експерименті LHCb у 2022 - 2023 рр. Метод асиметрій дає змогу відрізнити різні умови проведення експерименту від інжекції пучків до їхнього скидання (див. рис. 2), режим стабільної світності у колайдерному режимі (рис. 3 - 5) та у режимі фіксованої газової мішені (рис. 6 і 7).

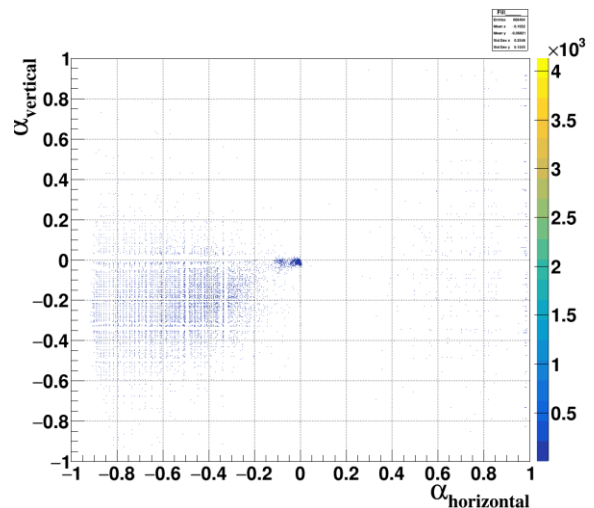


Рис. 2. Можлива область локалізації фізичних подій RMS-R3 на площині асиметрій відгуку її сенсорів (у вертикальному та горизонтальному напрямках). На площині асиметрій від -1 до 1 «діаметри» локалізації фізичних подій (локусів) становлять $\sim 5 - 20 \cdot 10^{-3}$ од. ас., а зміщення локусів – до $1 \cdot 10^{-3}$. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Горизонтальна та вертикальна осі представлені в одиницях асиметрії відгуків сенсорів «лівий - правий» ($\alpha_{\text{horizontal}}$) та «верхній - нижній» (α_{vertical})

відповідно. Відповідно до формули (1) фізичні події можуть заповнювати двовимірну площину асиметрій від -1 до 1 у горизонтальному та вертикальному напрямках. Як видно на рис. 2, спостерігається добре виражена концентрація подій (локус) з деяким значенням центра ваги. Ці значення дуже малі. Ці результати вимірювань стали можливими завдяки унікальній стабільності траєкторій пучків ВАК та високій чутливості й стабільному функціонуванню RMS-R3.

3. Основні результати роботи RMS-R3 протягом 2022 - 2023 рр. у Run-3 на експерименті LHCb

3.1. Асиметрії для області взаємодії

Аналіз отриманих експериментальних даних RMS-R3 продемонстрував її надійне функціонування з високими характеристиками чутливості та

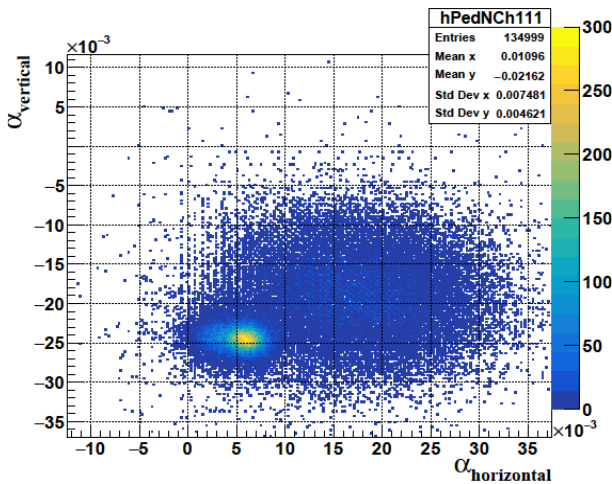


Рис. 3. Залежність асиметрії відгуків сенсорів RMS-R3 від параметра зіткнень ядерних пучків, μ . Серія зіткнень № 8685 (Fill 8685). Енергія протонного пучка 6,8 TeV. Горизонтальна вісь – асиметрія відгуку сенсорів «лівий - правий». Вертикальна вісь – асиметрія відгуку сенсорів «верхній - нижній». Для малоінтенсивного локусу (зліва) $\mu = 1,1$. Для потужнішого локусу (справа) $\mu = 0,1$. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Двовимірні розподіли асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 (див. рис. 3 і 4) дали можливість визначити положення центрів локалізації фізичних подій з такими координатами: $\mu = 10$ $\alpha_{\text{vertical}} = (-23,25 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ та $\alpha_{\text{horizontal}} = (-3,35 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$; $\mu = 1,0$ $\alpha_{\text{vertical}} = (-24,75 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ та $\alpha_{\text{horizontal}} = (6,25 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$; $\mu = 0,1$ $\alpha_{\text{vertical}} = (-19,5 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ та $\alpha_{\text{horizontal}} = (18,85 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$.

Метод асиметрій для відгуків RMS-R3, отриманих у 2022 - 2023 рр., дає змогу також відрізняти різні умови проведення експерименту, таких, як зміна стану (відкритий - закритий) вершинного детектора VELO (рис. 5) або зіткнення протонних пучків із різними інжектowanними газами системи

стабільності відгуку на потоки заряджених частинок. Використання оригінальних методів ідентифікації та оцінки стабільності експериментальних умов (метод асиметрії) дає змогу спостерігати зміщення області взаємодій пучків ВАК, або взаємодії пучка ВАК із ядрами фіксованої мішені SMOG2 при нормальних умовах та інжекції пучків та/або газу “a la SMOG1” (тобто без використання накопичувально-концентруючої комірки SMOG2), а також оцінити область взаємодії при варіації параметра μ , середньої кількості протон-протонних взаємодій на перетин в одному банчі пучків. Ця функціональна характеристика RMS-R3 ілюструється даними двовимірних розподілів асиметрій для різних значень параметра μ – середньої кількості протон-протонних взаємодій на один перетин пучків, що прямо пропорційно змінює миттєву світність експерименту (див. рис. 3 і 4).

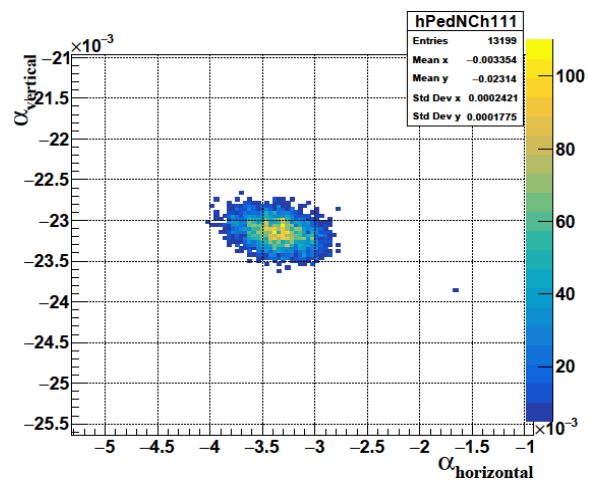


Рис. 4. Асиметрії відгуків сенсорів RMS-R3 при значенні параметра зіткнень ядерних пучків, $\mu = 10$. (Позначення осей, як на рис. 3). Серія зіткнень № 8782 (Fill 8782). Енергія протонного пучка 6,8 TeV. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

SMOG2:Ar (рис. 6) або декількох газів протягом одного прогону пучків (рис. 7).

3.2. Стабільність RMS-R3 та використання системи на пульті управління експерименту LHCb

В експерименті LHCb довгий проміжок часу за допомогою RMS-R3 в режимі онлайн здійснювався лише моніторинг відносної світності в експерименті LHCb (рис. 8), інші дані аналізувалися в режимі офлайн за вибіркою. Для оцінки якості Run-3 і стабільності експериментальних умов написано базові програмні коди RMS-R3 для онлайн-аналізу і графічних інтерфейсів з блоком управління LHCb через WinCC [5].

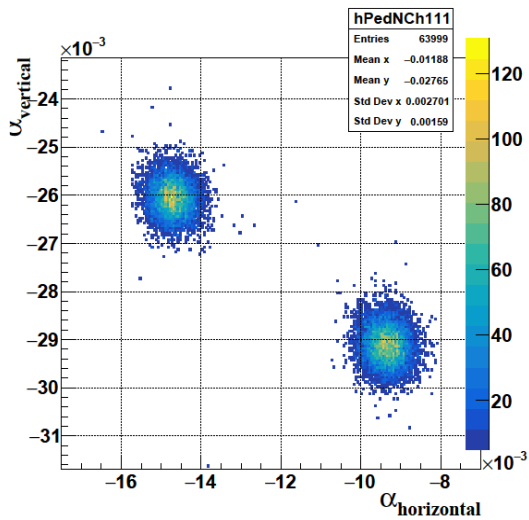


Рис. 5. Збільшене зображення двовимірного розподілу асиметрій даних відгуку сенсорів RMS-R3, що спостерігаються при протон-протонних зіткненнях при енергії протонного пучка 6,8 TeV. Серія зіткнень № 8387 (Fill 8387). Два локуси відповідають випадкам закритого стану VELO: $\alpha_{\text{vertical}} = (-26,1 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ і $\alpha_{\text{horizontal}} = (-14,75 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ і відкритого стану VELO: $\alpha_{\text{vertical}} = (-29,15 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ та $\alpha_{\text{horizontal}} = (-9,35 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

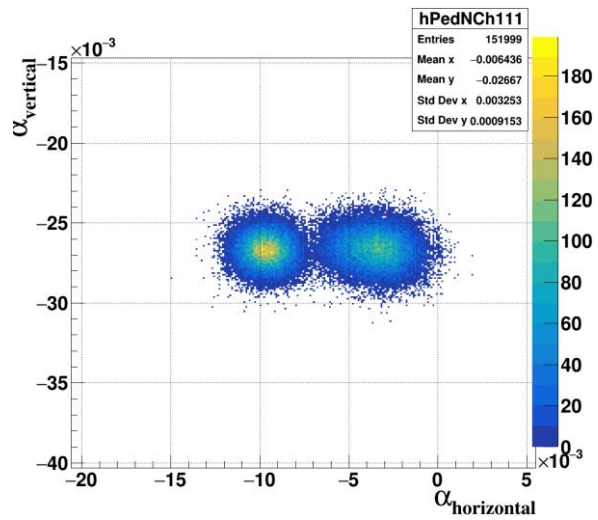


Рис. 6. Локус асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для протон-протонних взаємодій (зліва) та локус взаємодій пучка з фіксованою газовою мішенню аргону SMOG2 (справа). Серія зіткнень № 7963 (Fill 7963). Енергія протонного пучка 6,8 TeV. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

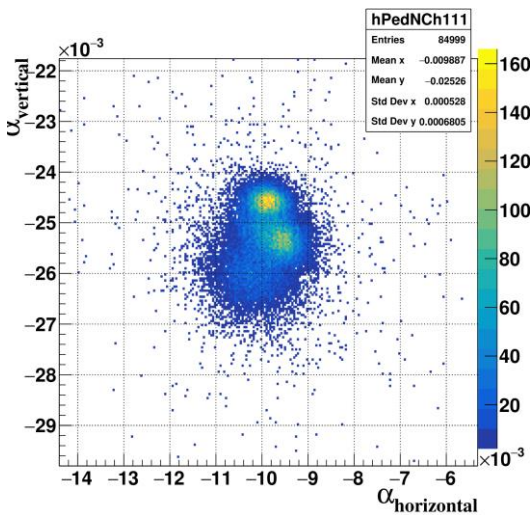


Рис. 7. Локуси асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для протон-протонних зіткнень (великий локус посередині), зіткнень пучка протонів з гелієм (маленький локус справа) та H2 (маленький локус зліва). Серія зіткнень № 8474 (Fill 8474). Енергія протонного пучка 6,8 TeV. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

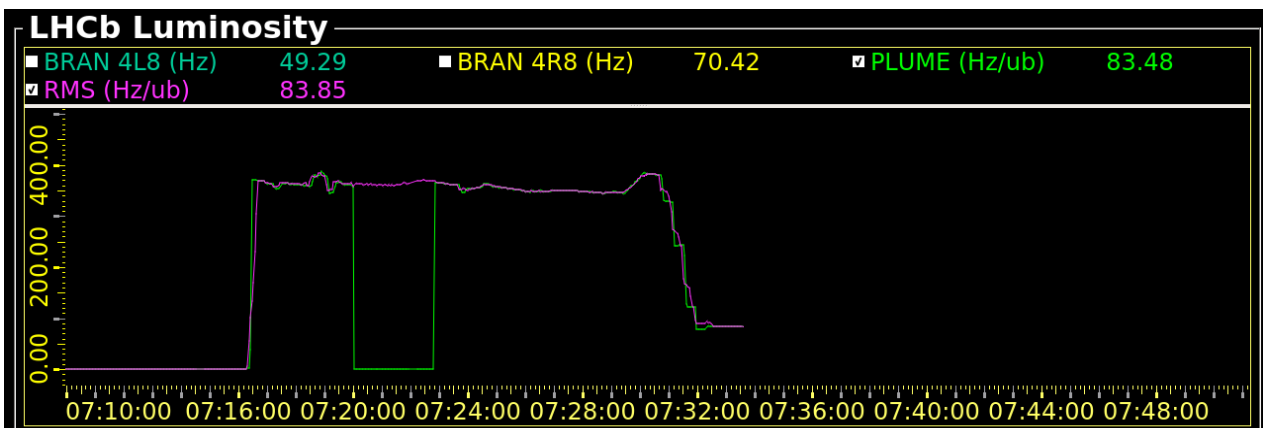


Рис. 8. Екран контролю світності на пульті управління експериментом LHCb. Зеленим кольором позначено світність, що була розрахована системами LHCb (зокрема за допомогою основного люменометра PLUME), фіолетовим – світність, що була розрахована за допомогою відгуків сенсорів RMS-R3. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)



Рис. 9. Одне з робочих вікон графічного інтерфейсу користувача для RMS-R3 у програмному середовищі WinCC. Метод асиметрій для відгуку сенсорів RMS-R3 у режимі онлайн. Проекція локусу асиметрій на вісь X (для пари сенсорів «лівий - правий») для першого (зверху) і другого (знизу) сенсорів RMS-R3 у режимі реального часу. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Розробка програмного проекту для LHCb WinCC відображає інформацію про зчитування даних системою RMS-R3 та містить інформацію для швидкого усунення нештатних ситуацій. При використанні онлайн-методу асиметрій RMS-R3 може самостійно вимірювати відносну миттєву світність і надавати дані про положення області взаємодії з високою точністю. Перевагою цих програмних рішень стане створення нового інструментарію (графічні панелі, онлайн- та референс-графіки/розподіли тощо) для операторів та повна інтеграція RMS-R3 в структуру моніторингу LHCb. Технічна підтримка програмного забезпечення RMS-R3 та його удосконалення сприятиме ефективній та сталій роботі LHCb. На рис. 9 представлено один із прикладів реалізації графічних панелей.

4. Висновки

Результати аналізу даних 2022 - 2023 рр. демонструють високі функціональні характеристики

моніторингової системи RMS-R3. Система забезпечує надійне та прецизійне спостереження області взаємодії ядерних зіткнень в експерименті LHCb, а також її еволюцію з часом або при зміні умов експерименту.

Зокрема, визначено зміни локалізації фізичних подій на двовимірній площині асиметрій відгуку сенсорів системи при зміні параметра середньої кількості протон-протонних зіткнень на один перетин згустків пучків (bunch crossing). Встановлено залежність цих локалізацій подій від робочого стану (відкритий/закритий) вершинного детектора VELO, а також взаємодій пучка з ядрами інжектованої газової мішені.

Розробка віртуального монітора контролю асиметрій у програмному середовищі WinCC дасть змогу операторам на пульті управління LHCb відслідковувати зміни області взаємодії у режимі онлайн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. S.B. Chernyshenko et al. RMS-R3 – the system for monitoring the region of interactions and background at the LHCb experiment (CERN). *Nucl. Phys. At. Energy* 24(2) (2023) 148.
2. LHCb Collaboration. *Framework TDR for the LHCb upgrade: Technical Design Report*. CERN/LHCC 2012-007 (Geneva, CERN, 2012) 62 p.
3. LHCb Collaboration. *LHCb SMOG Upgrade. Technical Design Report*. CERN-LHCC-2019-005 (Geneva, CERN, 2019).
4. V. Pugatch et al. Metal foil detectors and their applications. *Nucl. Instr. Meth. A* 535(1-2) (2004) 566.
5. L.G. Cardoso et al. LHCb MiniDAQ control system. *EPJ Web of Conferences* 214 (2019) 01005.

S. B. Chernyshenko*, V. M. Dobishuk, V. M. Pugatch

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: chsb2010@gmail.com

**FUNCTIONALITY FEATURES OF THE RMS-R3 SYSTEM
IN THE THIRD PHYSICS RUN OF THE LHCb EXPERIMENT**

The upgraded LHCb detector allows the collection of data in the third physics run at instantaneous luminosity up to $2 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ in proton-proton collisions at energy up to 14 TeV. A set of high-speed monitoring systems, including the RMS-R3 system, which monitors the nuclear interactions in the interaction region of the IP-8 (LHCb) experiment and the background, ensures the effective conduct of the experiment. An important functional characteristic of this system is the observation of luminosity stability over a wide dynamic range, which in its upper limit provides a linear response at ten times the nominal luminosity. This paper illustrates a new functionality feature of the RMS-R3, which is its ability to produce highly accurate data on the localization of the physical events of nuclear collisions in the interaction region of the experiment. The data measured in 2022 - 2023 allow us to observe the parameter variation impact of the nucleus-nucleus average number interactions in a single bunch crossing of the beams, the change of the state of the VELO detector and the injection of gaseous target SMOG2 by different gases.

Keywords: LHCb experiment, luminosity and background monitoring system, monitoring of interaction region by asymmetry method of system response.

Надійшла / Received 11.01.2024