

УДК 681.518.3, 681.518.5

## СИСТЕМА АНАЛИЗА ДАННЫХ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-2

Г. А. Фаткин

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11  
Новосибирский государственный университет,  
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2  
E-mail: G.A.Fatkin@inp.nsk.su*

Рентгенографический комплекс ЛИУ-2, созданный на базе линейного индукционного ускорителя, является сложной электрофизической установкой с большим количеством объектов управления. Специфика проводимых с помощью комплекса опытов требует обеспечить высокую надёжность его работы. Элементы установки представляют собой мощные импульсные высоковольтные устройства, параметры которых могут изменяться в ходе эксплуатации. Описывается система, позволяющая автоматически выявлять сбои и неисправности с помощью анализа ансамбля осциллограмм, характеризующих работу отдельных элементов установки при проведении опытов. Система анализа построена на основе программных средств HDF5, numpy, scipy, pytables и matplotlib. Приведены результаты обработки первых экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* индукционный ускоритель, анализ данных, система обработки данных.

**Введение.** Метод импульсной радиографии актуален для изучения быстропротекающих гидродинамических процессов, определяющим фактором которого являются качество рентгеновского излучения и надёжность его источника. Наилучшее качество на настоящий момент обеспечивают источники на базе линейных индукционных ускорителей.

В 2012 году в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте технической физики (РФЯЦ—ВНИИТФ, г. Снежинск) был введён в эксплуатацию рентгенографический комплекс на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2, предназначенный для изучения быстропротекающих гидродинамических процессов [1]. Мощная установка ЛИУ-2 генерирует пучок электронов с энергией до 2 МэВ и током до 2 кА.

Приведём краткое описание структуры системы управления и аппаратных средств установки (более подробно см. работу [2]). Упрощённая схема ускорителя ЛИУ-2 представлена на рис. 1. Пучок электронов формируется в катодном узле, проходя через электронно-оптический тракт, достигает энергии 2 МэВ, после чего фокусируется и попадает на мишенный узел. Ускоряющее напряжение получается с помощью 96 индукторов, на каждом из которых формируется импульс напряжения около 23 кВ и длительностью 300 нс. Напряжение создаётся 48 модуляторами, каждый из них подаёт питание на два индуктора. Пучок фокусируется тремя электромагнитными линзами и двумя корректорами. Кроме перечисленных установка включает большое количество других устройств, требующих контроля: коллиматор, вакуумная подсистема и т. д.

В результате взаимодействия пучка с танталовой мишенью формируется импульс гамма-излучения. Процесс формирования такого импульса будем далее называть выстрелом. Качество выстрела, определяющее пространственное разрешение рентгенографического комплекса, зависит от характеристик пучка, на которые, в свою очередь, влияет своевременность срабатывания и правильная настройка всех элементов установки. Особый ха-

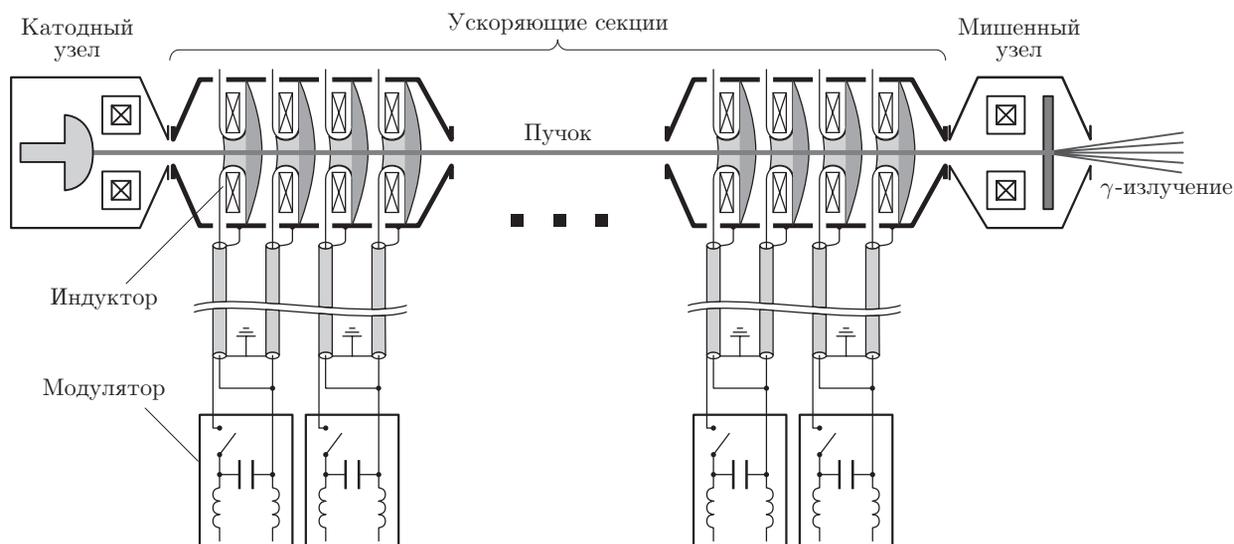


Рис. 1

рактически проводимых рентгенографических опытов делает их повторение сложным и дорогостоящим, поэтому перед опытом производится некоторое количество пробных выстрелов с последующей оценкой качества рентгенографического изображения. Тем самым подтверждается правильный выбор всех необходимых параметров. Однако всегда остаётся вероятность сбоя одного или нескольких элементов, поэтому необходимо иметь возможность определять такие элементы с тем, чтобы обеспечивать некоторую наперёд заданную надёжность установки.

Система управления позволяет записать 112 «быстрых» (с шагом 5 нс) и «медленных» (с шагом 250 нс) осциллограмм, по виду которых можно судить о работе отдельных элементов установки: модуляторов, индукторов, электромагнитных линз и др. Общее количество настраиваемых параметров, отвечающих за работу установки, достаточно велико — более 1000. Управление осуществляется с помощью программного обеспечения *scx-server* [3]. Интерфейс оператора позволяет управлять параметрами и наблюдать за осциллограммами каждого выстрела на установке. Внешний вид основного окна интерфейса оператора показан на рис. 2 (*a* — панель управления модуляторами, *b* — панель вывода осциллограмм, *c* — панель управления синхронизацией и блокировками). Большое количество сигналов и параметров, характеризующих работу установки, делает определение отказов человеком весьма затруднительным. Поэтому одной из задач данной публикации был подбор удобных форм представления информации, которые дали бы возможность оператору следить за состоянием установки и настраивать её более эффективно.

Автоматическое выявление сбоев отдельных элементов по виду осциллограмм в общем случае является задачей распознавания образов. Ввиду её сложности в данной работе предлагается провести параметризацию, которая позволит вместо задачи распознавания образов решать существенно более простую задачу кластеризации.

В мире действует лишь пять подобных рентгенографических комплексов на базе линейных индукционных ускорителей, специфика проводимых на них экспериментов ограничивает количество публикаций. Как можно судить по [4], на установке FXR (США) реализуется подход, основанный на параметризации осциллограмм, однако конкретные методы не уточняются. Из [5] ясно, что на установке DARHT (США) используется разветвлённая система сбора и анализа данных, хотя непосредственные способы анализа не приводятся. В [6] для определения состояния устройства AIRIX (Франция) применяются нейронные сети.

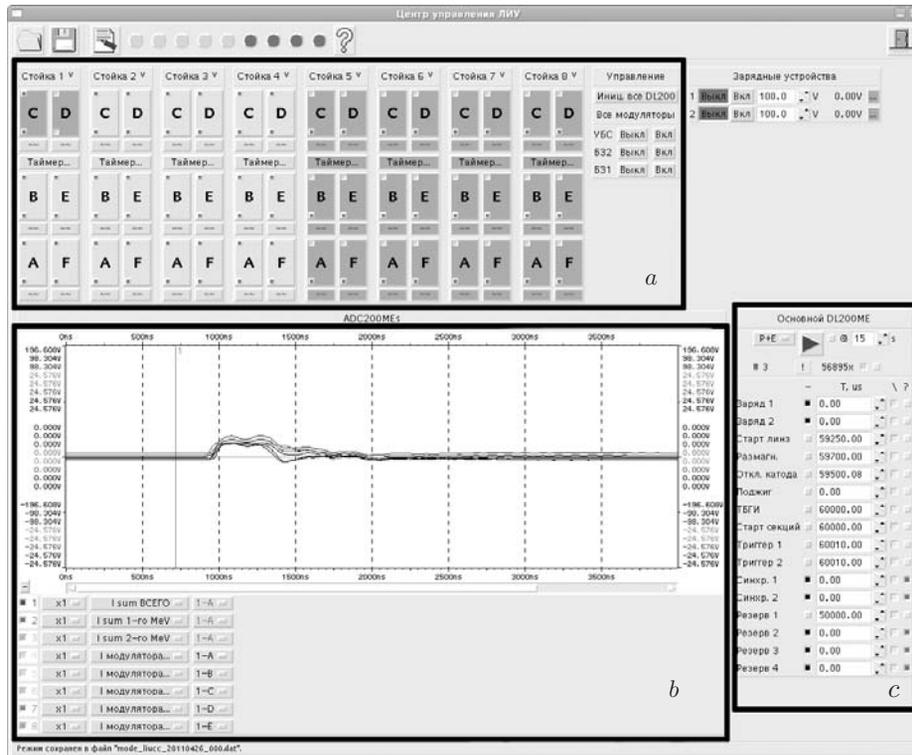


Рис. 2

Цель предлагаемой работы — создание системы, позволяющей автоматически выявлять и индентифицировать для оператора сбои отдельных элементов установки и накапливать статистику по работе установки. В дальнейшем такая статистика может использоваться для расчёта вероятности сбоя отдельных элементов и установки в целом.

**Анализ и обработка данных.** Упрощённая схема сбора и анализа данных о работе установки представлена на рис. 3. В этой схеме из всех объектов управления рассматриваются только 48 модуляторов и 48 индукторных секций по два индуктора. Модуляторы разбиваются на восемь секций по шесть модуляторов в каждой. Показания трансформаторов тока для  $k$ -го модулятора  $I^k$ , характеризующие его работу, и показания ёмкостных делителей напряжения, расположенных непосредственно в индукторном модуле  $U^k$ , оциф-

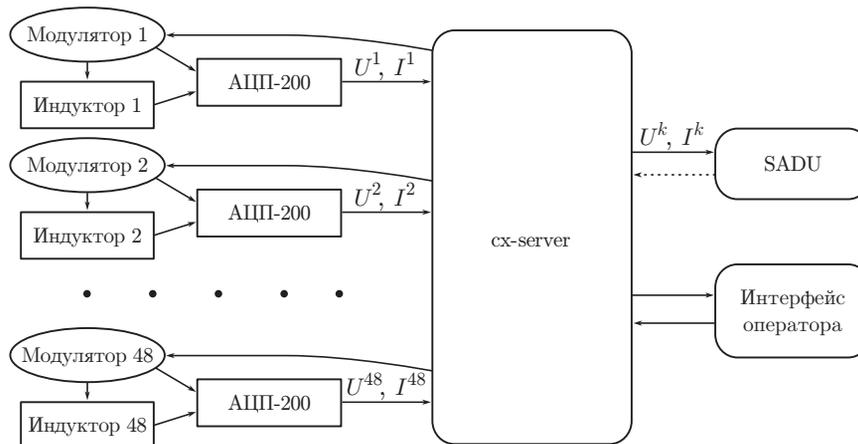


Рис. 3

ровываются двухканальным измерителем формы импульсных сигналов АЦП-200 [2]. Эти две величины связаны между собой, таким образом обеспечивая резервирование по каналам обработки информации.

Для каждого выстрела по 48 цифровых осциллограмм  $U^k$  и  $I^k$  поступают в систему управления *sc-server* и отображаются в окне интерфейса оператора. Также они сохраняются для дальнейшей статистической обработки в системе анализа данных SADU.

Одним из первых подходов, облегчивших работу оператора с большим количеством осциллограмм, был вывод всех осциллограмм на один график с наложением. Это позволило точно подстраивать времена запуска модуляторов. Такой график оказался весьма полезен и при наладке электронно-оптической системы для визуального определения пробоев.

Далее верхним индексом будем обозначать номер модулятора, нижним — номер точки, а в скобках при необходимости указывать порядковый номер выстрела. Например,  $U_i^5(n)$  будет обозначать  $i$ -ю точку осциллограммы напряжения на индукторе, подключённом к модулятору 5, при  $n$ -м выстреле. Следующим шагом, упрощающим работу, был вывод в окне интерфейса оператора различных сумм осциллограмм напряжений и токов. Суммирование производится по отдельным секциям, по модуляторам, обеспечивающим ускорение до 1 и 2 МэВ, а также по полному набору осциллограмм.

Так, полная сумма модулей напряжений, которая показывает распределение энергии по длине пучка, выражается следующим образом:

$$E_i(n) = \sum_{k=1}^{48} |U_i^k(n)|. \quad (1)$$

Сумму для  $m$ -й секции, оказавшуюся достаточно удобной для локализации возникающих пробоев, можно вычислить по формуле

$$E_i^m(n) = \sum_{k=6(m-1)}^{6m} |U_i^k(n)|. \quad (2)$$

Однако, несмотря на некоторое упрощение работы оператора, такой подход не позволял эффективно определять отказы отдельных элементов. Кроме того, требуется накапливать статистику работы установки с тем, чтобы анализировать причины отказов, вычислять вероятность сбоя при проведении эксперимента, а также определять выходящие из строя модуляторы.

**Система статистического анализа данных.** Для решения этих задач разработана система статистического анализа данных, блок-схема которой представлена на рис. 4. В системе используется библиотека *numpy* [7], позволяющая эффективно обрабатывать большие массивы данных, формулируя правила обработки на языке высокого уровня Python. Массивы данных хранятся в высокопроизводительном хранилище данных HDF5 [8], для доступа к ним применена библиотека *pytables* [9]. Для интерактивной работы с данными используется *ipython* [10], а для построения графиков и диаграмм — *matplotlib* [11].

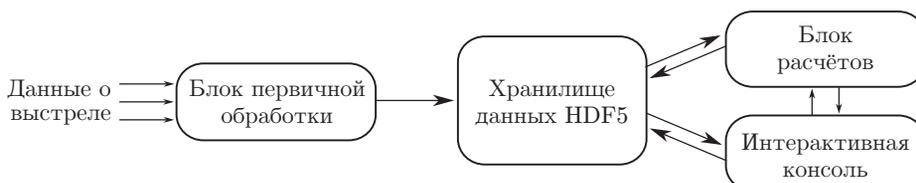


Рис. 4

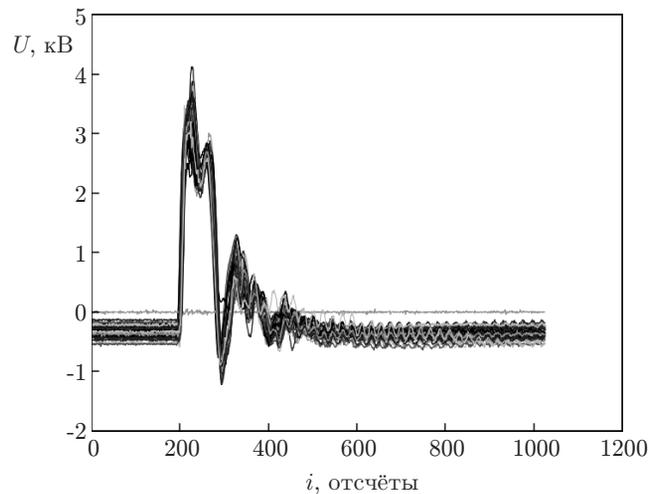


Рис. 5

Система анализа данных SADU состоит из блока первичной обработки, блока расчётов, базы данных и интерактивной консоли. Блок первичной обработки отвечает за преобразование данных из формата .blk, в котором информация поступает из sx-server, во внутренний формат и добавление их в базу данных HDF5. В блок расчёта можно добавлять произвольные вычислительно сложные функции обработки, которые выполняются в фоновом режиме, а результат записывается в базу. Интерактивная консоль позволяет проводить любые математические преобразования с данными из базы HDF5, а также строить графики и диаграммы на их основе.

В ходе работ на установке с ноября 2012 г. по февраль 2013 г. накоплена информация о 890 выстрелах по 1000 точек каждый. Пример графика наложенных осциллограмм напряжения для одного из выстрелов приведён на рис. 5.

При каждом выстреле в блоке расчёта для всех осциллограмм тока и напряжения вычисляются следующие величины (пропорциональные среднему значению):

$$SI^k(n) = \sum_i I_i^k(n); \quad SU^k(n) = \sum_i U_i^k(n), \quad (3)$$

а также величины, эквивалентные «центру масс»:

$$MI^k(n) = \frac{\sum_i i |I_i^k(n)|}{|SI^k(n)|}, \quad MU^k(n) = \frac{\sum_i i |U_i^k(n)|}{|SU^k(n)|}. \quad (4)$$

Распределение  $S$  и  $M$  (канал напряжений) для всех модуляторов по всем обработанным выстрелам показано на рис. 6. Из диаграммы видно, что можно выделить несколько кластеров.

Кластер I, расположенный вдоль оси  $S = 0$ , соответствует отсутствию напряжений на модуляторах при выключенном либо не работающем зарядном устройстве, либо при запрете запусков оператором. Разброс по оси  $M$  в этом кластере объясняется шумами и смещением нуля осциллографа. Действительно, среднее значение шума равно нулю, а центр масс будет находиться примерно посередине осциллограммы, так как мощность шума распределена равномерно.

Кластер II соответствует рабочим напряжениям выстрелов при различной энергии, к нему же относятся точки, соответствующие пробоям в электронно-оптической системе.

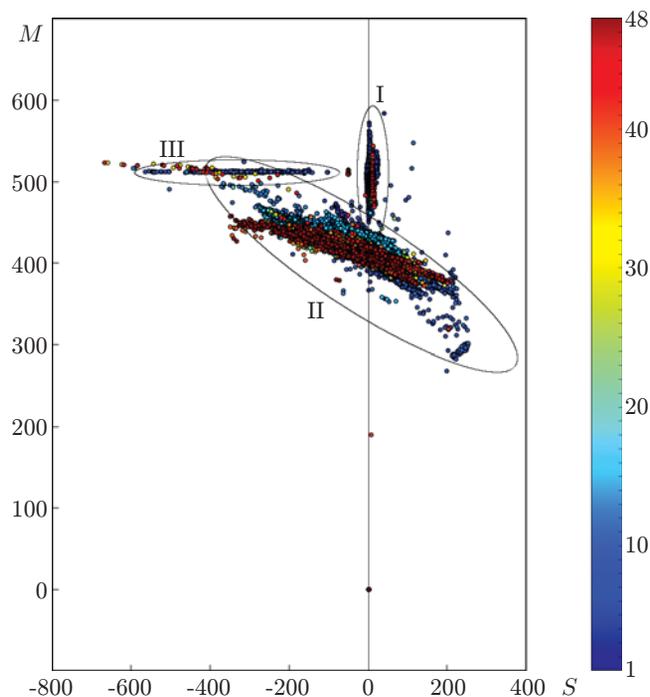


Рис. 6

Расположение точки в левой или правой полуплоскости относительно оси  $S = 0$  определяется отношением величины напряжения размагничивания и напряжения на индукторе: чем правее находится точка, тем большее напряжение подаётся на индуктор.

Кластер III соответствует неподключённому каналу АЦП (благодаря анализу удалось обнаружить разрыв кабеля, долгое время не замеченный операторами установки).

Для определения кластера, которому принадлежит точка, а также разделения точек кластера II на соответствующие рабочему состоянию и пробую можно применять алгоритмы кластеризации. Такой подход позволяет выявить не только сбои, но и их причины. Для кластеризации на установке AIRIX [6] используется нейронная сеть. Вероятно также, что выбор более удачной параметризации даст возможность точнее разделить кластеры. В настоящее время запланирована дальнейшая работа в этом направлении: расширить набор параметров, в частности включить в него данные о режиме работы, а также некоторые параметры из [12].

Для выявления сбоев применяется более простой способ. В исследуемом периоде было два сценария эксплуатации установки. Первый — испытательный, когда проводится ряд выстрелов с постепенным повышением энергии для определения рабочего диапазона установки. Вторым — экспериментальный, когда производится несколько пробных выстрелов, в которых проверяются качество генерируемого пучка и настройка ускорителя, а затем осуществляется опыт. Оба сценария характеризуются плавным изменением вида осциллограмм от выстрела к выстрелу. Резкое же изменение их вида свидетельствует о сбое в данном модуляторе либо пробое в индукторе. Причём пробой в одном индукторе обычно влечёт за собой пробой в соседних индукторах.

Для оценки плавности изменения осциллограмм введена величина, характеризующая относительное отклонение между двумя соседними выстрелами:

$$\Delta^k(n) = \sum_j |X_j^k(n) - X_j^k(n-1)|, \quad (5)$$

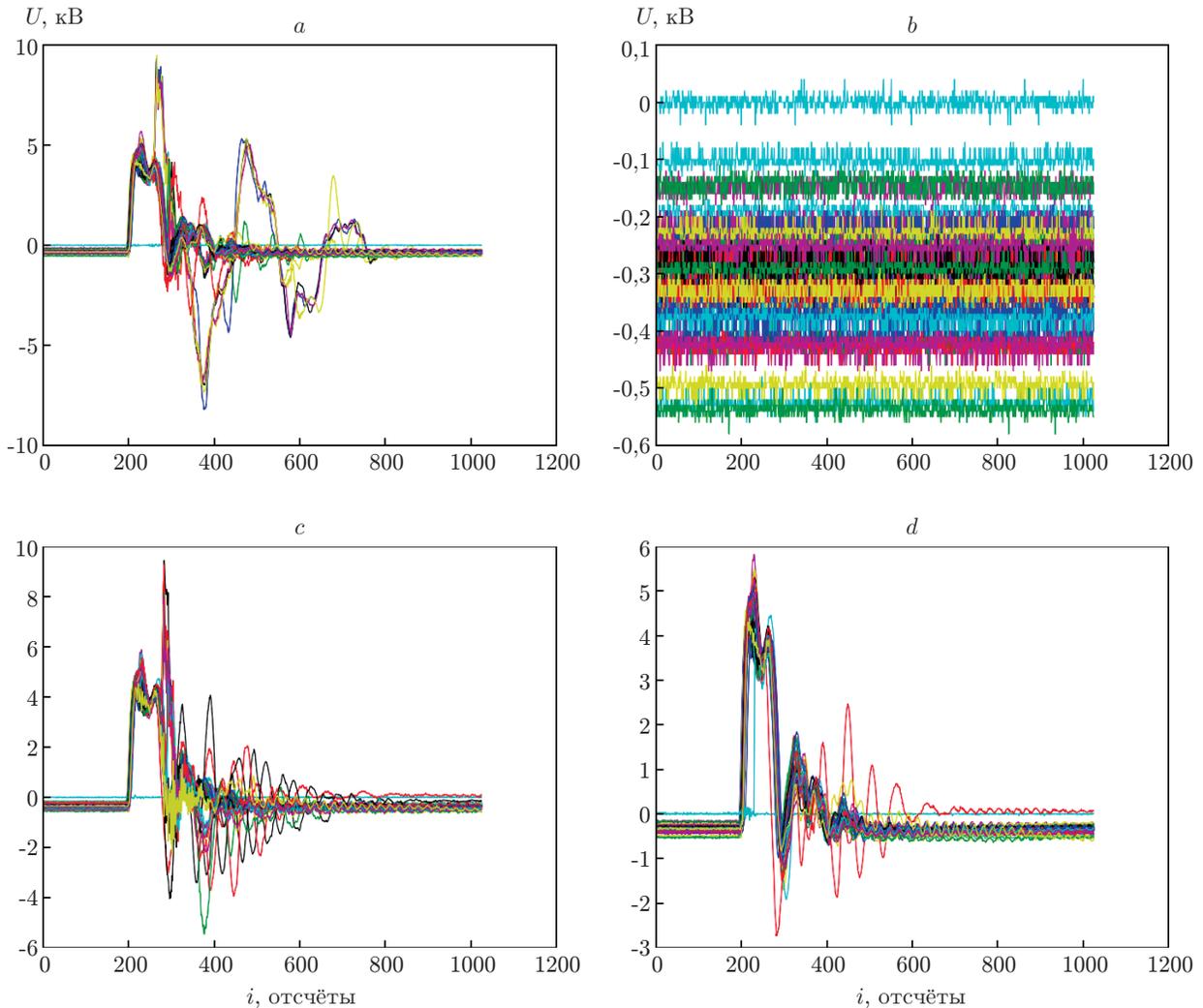


Рис. 7

где  $n$  — текущий номер выстрела, а вместо  $X$  следует  $I$  либо  $U$  в зависимости от типа осциллограммы.

Эмпирическим путём был найден критерий выявления сбоев, не дающий ложных срабатываний для обработанного массива данных (критерий, естественно, зависит от условий эксплуатации):  $\Delta > 700$ . Возможный недостаток такого критерия — невыявление некоторых реальных сбоев. В дальнейшем планируется ввести адаптивную подстройку критерия. Типичные примеры выявленных сбоев представлены на рис. 7 ( $a$  — пробой в одной секции,  $b$  — несрабатывание всех модуляторов,  $c$  — общий пробой,  $d$  — сбой одного модулятора).

На базе данного критерия построены графики количества сбоев. Для того чтобы определить наименее надёжные модуляторы, вычитались случаи, когда происходил сбой всех модуляторов, что соответствовало либо полному пробую, либо отсутствию сигнала запуска, либо выключенному зарядному устройству. Была построена диаграмма распределения количества сбоев по модуляторам (рис. 8). На основе анализа локализованы элементы установки, наиболее подверженные сбоям, и проведена работа по повышению их надёжности. Выявлены: нерабочий канал осциллографа, ненадёжные места в электронно-оптической системе, а также часто сбивающиеся модуляторы.

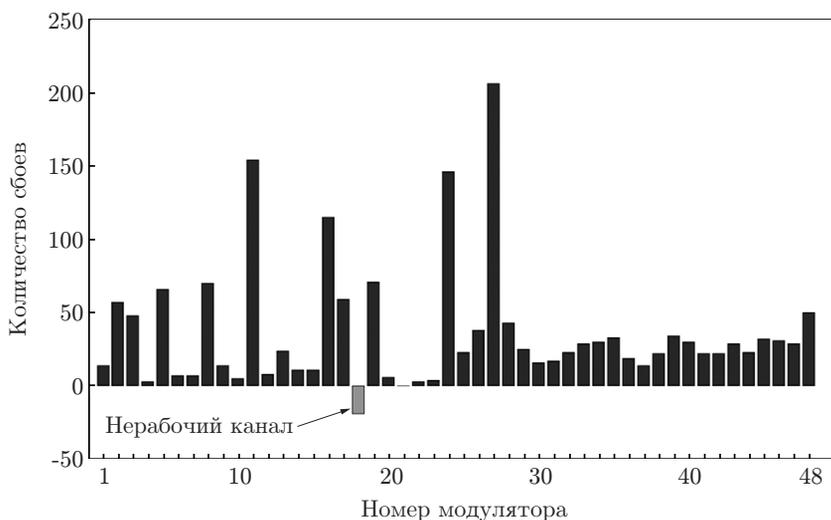


Рис. 8

**Заключение.** Предлагаемые формы представления информации позволили оператору следить за состоянием установки и эффективно её настраивать. Реализованная система SADU даёт возможность определять сбои в модуляторах и набирать статистику, обрабатывая большие объёмы информации. Благодаря анализу данных о работе установки на начальном этапе были выявлены наиболее часто встречающиеся причины сбоев и проблем. Представленная публикация является первым этапом в повышении надёжности рентгенографической установки ЛИУ-2. В дальнейшем планируется реализовать отображение информации о сбоях в интерфейсе оператора, построить адаптивный критерий определения сбоев, а также рассчитывать надёжность элементов установки.

Выявлена необходимость расширить набор обрабатываемой и сохраняемой в базе информации и включить в неё ряд «технических» осциллограмм, характеризующих функционирование модуляторов и других устройств на установке, а также осциллограммы с датчиков положения пучка, трансформаторов тока пучка и ёмкостного делителя напряжения.

Автор выражает благодарность коллегам из ИЯФ СО РАН и РФЯЦ—ВНИИТФ, работавшим над проектированием, наладкой, запуском и эксплуатацией установки ЛИУ-2, а также д-ру техн. наук А. М. Батракову за полезные обсуждения работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bolkhovityanov D., Eliseev A. A., Fatkin G. A. et al.** Performance of 2 MeV, 2 kA, 200 ns linear induction accelerator with ultra low beam emittance 110 for X-ray flash radiography // Proc. of IPAC. San Sebastian, Spain, 2011. P. 1906–1908.
2. **Бак П. А., Батраков А. М., Кадыров Р. А. и др.** Система управления линейным индукционным ускорителем рентгенографического комплекса: структура, аппаратные средства, результаты опытной эксплуатации // Автометрия. 2011. **47**, № 3. С. 120–131.
3. **Bolkhovityanov D.** UI-oriented approach for building modular control programs in VEPP-5 control system // Proc. of PCaPAC-2006. Newport News, USA, 2006. P. 111–113.
4. **DeHope W. J., Jacob J. S., Kreitzer B. R. et al.** "Real-life" pulse flattening on the LLNL flash X-ray (FXR) machine // Proc. of the XVI IEEE Intern. Pulsed Power Conf. IEEE Xplore, 2007. P. 1261–1263.

5. **Archuleta R., Sanchez L.** The DARHT data acquisition, archival, analysis and instrument control system (DAAAC), and network infrastructure // Proc. of the XXIV Linear Accelerator Conf. Victoria, Canada, 2008. P. 337–339.
6. **Ribes J. C., Delaunay G., Delvaux J.** RBF neural net based classifier for the AIRIX accelerator fault diagnosis // Proc. of PPS-2001. Las Vegas, USA. 17–22 June, 2001. Vol. 2. P. 1004–1007.
7. **Пакет** матричной арифметики Numpy. URL: <http://www.numpy.org/> (дата обращения: 17.09.2013).
8. **The HDF Group.** Hierarchical Data Format, version 5. 1997–2014. URL: <http://www.hdfgroup.org/HDF5/> (дата обращения: 17.09.2013).
9. **Alted F., Vilata I., Prater S. et. al.** PyTables: Hierarchical Datasets in Python. 2002–2014. URL: <http://www.pytables.org/> (дата обращения: 17.09.2013).
10. **Pérez F., Granger B. E.** IPython: a system for interactive scientific computing // Comput. Sci. Eng. 2007. **9**, N 3. P. 21–29.
11. **Hunter J. D.** Matplotlib: A 2D graphics environment // Comput. Sci. Eng. 2007. **9**, N 3. P. 90–95.
12. **Заревич А. Е., Вегнер И. И., Визитенко И. И.** Автоматизированный комплекс для диагностики импульсов релятивистского СВЧ генератора // ПТЭ. 2004. № 3. С. 78–82.

*Поступила в редакцию 17 сентября 2013 г.*

---