

P9-2019-35

Б. В. Василишин *, В. И. Волков, Е. В. Горбачев,
В. Н. Карпинский, А. Е. Кириченко, Д. В. Монахов,
С. В. Романов, Г. С. Седых

ЦИКЛОЗАДАЮЩАЯ СИСТЕМА
БУСТЕРА НУКЛОТРОНА

* E-mail: vasilishinb@yandex.ru

Циклозадающая система бустера нуклотрона

Управление главным и двумя добавочными токами магнитной системы бустера нуклотрона осуществляется тремя наборами последовательностей «+» и «-» серий импульсов, вызывающих увеличение или уменьшение соответствующего тока на величину «кванта» тока, значение которого принято 0,01 А. Кроме того, для управления главным током требуются последовательности «+» и «-» серий, описывающих производную главного тока I'_0 со значением «кванта», равным 0,04 А/с. Особенностью используемых источников тока является то, что они управляются непосредственно импульсами серий, а не аналоговыми сигналами, полученными из них. Управление программным обеспечением, оборудованием и обменом с базой данных выполнено в системе TANGO.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2019

The System of Cycle Setting for Nuclotron Booster

The main and two additional currents of the magnetic system of the Nuclotron booster are controlled by three sets of “+” and “-” series of pulses, causing an increase or decrease in the corresponding current by the amount of “quantum” of the current, the value of which is taken to be 0.01 A. In addition, to control the main current, the sequences of “+” and “-” series describing the derivative of the main current I'_0 with the value of “quantum” equal to 0.04 A/s are also required. The peculiarity of used power supplies is that they are controlled directly by series pulses, and not by analog signals obtained from them. The control of software, equipment and exchange with the database is performed in the standard of TANGO system.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2019

Система питания бустера нуклотрона включает в себя три источника тока для обмоток дипольных магнитов и квадрупольных линз. Основные обмотки дипольных магнитов и квадрупольных линз соединены последовательно и запитываются током от главного источника. Кроме того, существуют две системы дополнительных обмоток. Первая из них объединяет соединенные последовательно дополнительные обмотки всех квадрупольных линз, а вторая — лишь квадрупольных линз Д. Каждая из этих систем запитывается током от отдельного источника. И эти токи связаны с основным током I_0 соотношениями

$$I_1 = k_1(t) I_0(t), \quad I_2 = k_2(t) I_0(t). \quad (1)$$

Коэффициенты пропорциональности k_1 и k_2 являются постоянными на большей части цикла и определяют значение частоты бетатронных колебаний, но на отдельных участках цикла требуется менять в некоторых пределах эти частоты, что и заложено в заданной зависимости этих коэффициентов от времени. Наличие же двух корректирующих токов позволяет независимо менять частоты горизонтальных и вертикальных колебаний, задавая соответствующую зависимость коэффициентов от времени. Особенно это важно перед выводом пучка из бустера, когда к вопросу выбора рабочей точки предъявляются особенно высокие требования.

В системе используются источники тока, разработанные в НПП ЛМ «Инвертор» (Москва). Каждый источник управляется двумя последовательностями импульсов: серии «+» и серии «-». Поступление импульса вызывает изменение (увеличение при серии «+», уменьшение при серии «-») тока на величину цены импульса, заданную для каждого источника. Частота поступления импульсов не должна превышать 5 МГц, длительность импульса не должна быть меньше 100 нс, а пауза между импульсами не должна быть короче 100 нс. Разумеется, при выборе параметров системы цена импульса для каждого источника (квант) выбиралась так, чтобы значение частоты импульсов в серии было существенно ниже предельного.

Главное назначение циклозадающей системы бустера — выдача на источник последовательности серий «+» и «-», описывающих требуемую зависимость токов источника от времени. Последовательности серий вырабатываются программируемыми таймерами (генераторами функций). По импульсу «старт» таймеры начинают работу и выдают последовательно все запрограммированные серии. Каждая серия характеризуется тремя параметрами: 1) ти-

пом серии («+» или «-»); 2) количеством импульсов; 3) частотой импульсов в серии, задаваемой в виде коэффициента деления частоты опорного генератора таймера, которая равна 40 МГц. Для управления источником главного тока используются серии, описывающие форму тока и производную главного тока по времени, т. е. две пары серий «+» и «-», вырабатываемых двумя программируемыми таймерами. Два источника токов дополнительных обмоток (I_1 и I_2) управляются двумя парами серий «+» и «-», описывающих функции $k_1(t)$ и $k_2(t)$. Кроме того, серии $I_0(t)$ и $I'_0(t)$ поступают на соответствующие ЦАПы, на выходе которых формируются аналоговые сигналы, отображающие соответствующие токи и используемые для диагностики.

Таким образом, структурные элементы бустера запитываются следующими токами.

1. Главный ток I_0 последовательно запитывает главные обмотки дипольных магнитов и квадрупольных линз. Максимальное значение тока задано 10 кА. Значения магнитного поля в зависимости от тока в обмотках приведены в табл. 1. Видно, что нелинейность не превышает 2%. Номинальное значение поля в диполях на столе при переводе пучка в нуклотрон составляет 1,7987 Тл, что соответствует току 9745 А.

Таблица 1. Значения магнитного поля в дипольных магнитах в зависимости от тока в обмотках

I , А	B , Тл
100	0,01875425
625	0,11717475
1000	0,18756375
2000	0,375353
3000	0,5631225
5000	0,9383725
7000	1,31275975
9000	1,6765825
9680	1,78800725
9745	1,7982955
10000	1,8381125

2. Добавочный ток I_1 последовательно запитывает обмотки квадрупольных линз Ф и Д. Максимальное значение этого тока составляет 600 А, т. е. $I_{1\max} = I_{0\max} \cdot 0,06$, а значит, верхнее значение коэффициента пропорциональности k_1 составляет 0,06. В общем случае зависимость $k_1(t)$ задается в диалоговой таблице, в которой каждому новому значению $k_1(t)$ ставятся в соответствие параметры t_1 и Δt .

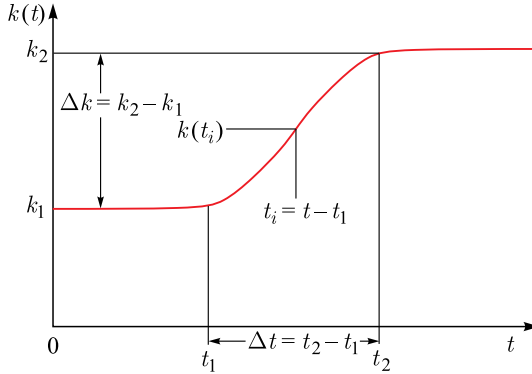


Рис. 1. Формула перехода от значения коэффициента $k = k_1$ до $k = k_2$

Коэффициент пропорциональности изменяется по следующему закону:

$$k(t_i) = k_1 + \frac{4\Delta k t_i^2}{\Delta t^2} - \frac{\Delta k}{2\pi^2} \cos^2\left(\frac{2\pi}{\Delta t}\left(t_i - \frac{\Delta t}{4}\right)\right), \quad t_i \in \left[0 - \frac{\Delta t}{2}\right], \quad (2)$$

$$k(t_i) = \Delta k - k(\Delta t - t_i), \quad t_i \in \left[\frac{\Delta t}{2} - \Delta t\right].$$

Смысл входящих в формулу (2) величин виден из рис. 1, где принимаем $t_1 = 0$. Можно проверить, что $k(0) = k_1$ и $k(\Delta t) = k_2$. Кроме того, вычисляя производные функции $k(t_i)$ простой подстановкой, убеждаемся, что все они в точках $t_i = 0$ и $t_i = \Delta t$ равны нулю.

3. Добавочный ток I_2 запитывает последовательно лишь обмотки квадрупольных линз Д. Максимальное значение тока составляет 300 А, а значит, верхнее значение коэффициента пропорциональности k_2 составляет 0,03. Аналогично зависимость $k_2(t)$ задается в таблице диалогового окна. Формулы для перехода от одного до другого значения коэффициента k_2 полностью аналогичны случаю с k_1 .

Основные параметры главного поля задаются через диалоговое окно программы, по виду во многом схожому с диалоговым окном для управления циклозадающей системой нуклотрона (рис. 2). Параметры диалогового окна в ячейках белого цвета доступны для модификации. Остальные величины носят лишь информативный характер и для модификации недоступны. При изменении любого параметра результат произведенного действия отображается на графике в правой верхней части диалогового окна.

В левой верхней части окна расположена таблица главных параметров цикла. Цикл условно разделен на участки. Каждому участку цикла соответствует строка таблицы, в первом столбце которой указан номер участка. Номера участков в таблице приведены также в верхней части графика.

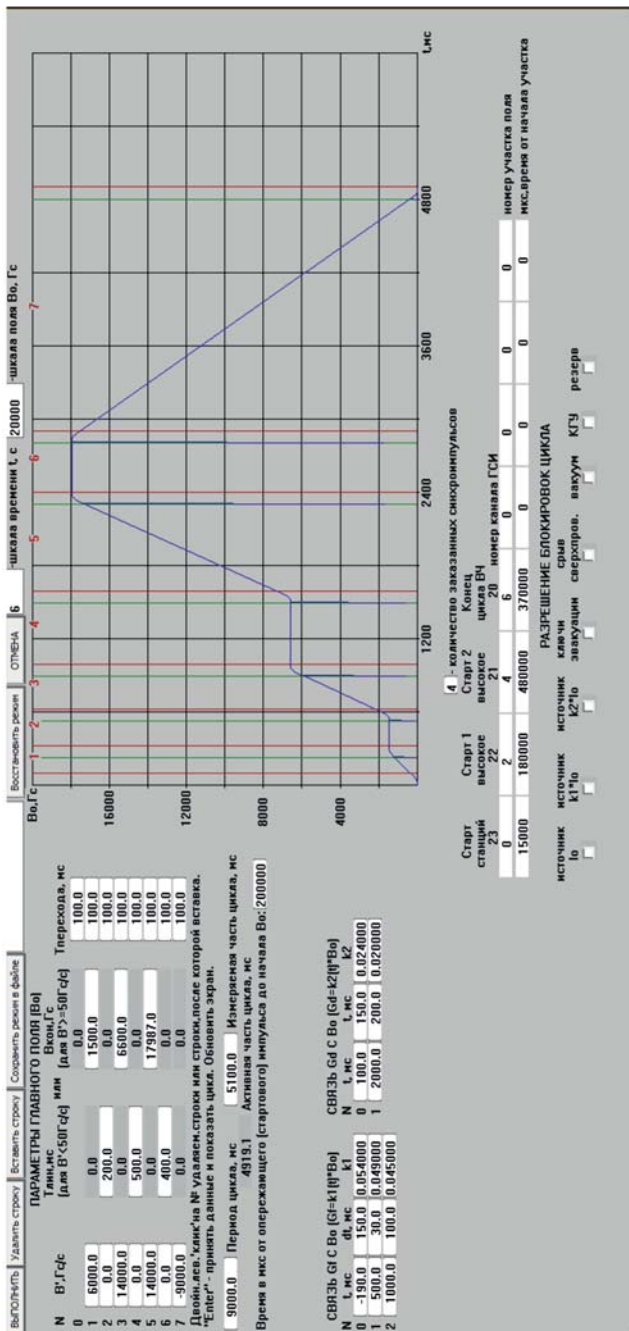


Рис. 2. Диалоговое окно для управления циклозадающей системой бустера

Каждый участок состоит из линейной части и переходной нелинейной части к следующему участку. Естественно, 0-й участок содержит лишь переходную нелинейную часть к 1-му участку цикла. Второй столбец таблицы содержит производные линейной части участка. Участки цикла разделяются на два вида: участки с 0-й или небольшой ($|\Delta B/\Delta t| < 50 \text{ Гс/с}$) по модулю производной («стол») и участки с производной, большей этого значения. Для первых участков задается длительность линейной части (длительность стола), для вторых — значение поля в конце этого участка, что и отражается в таблице. Нелинейные переходные части характеризуются длительностью перехода. К переходной части ставится требование равенства нулю всех производных (кроме 1-й) поля. Опишем закон, по которому изменяется поле на нелинейном переходном участке. Пусть производная поля в начале перехода равна g_1 , а в конце — g_2 , длительность перехода — Δt . Тогда переход осуществляется по формуле

$$B(t) = B(t_1) + g_1 t + \frac{(g_2 - g_1) t^2}{2\Delta t} - \frac{(g_2 - g_1) \Delta t}{2\pi^2} \cos^2 \left(\frac{\pi}{\Delta t} \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) \right), \quad (3)$$

где g_1 и g_2 — производные поля, Гс/с; t — время, с. Другие обозначения из формулы (3) и переход между участками цикла магнитного поля представлены на рис. 3, где показаны два варианта переходной части участка цикла, состыковка участков с различными по знаку производными поля на стыкуемых частях цикла (слева) и одинаковыми по знаку (справа). В случае состыковки участка с нулевой производной (стол) с участком с изменяющимся полем соответствующие значения g_1 или g_2 полагаются равными нулю.

Заданный в табл. 1 закон пересчитывается с помощью кривой насыщения поля в закон следования серий импульсов для управления главным током.

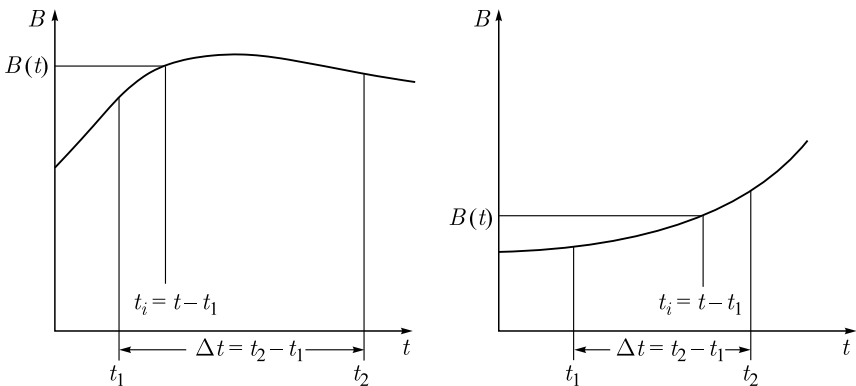


Рис. 3. Переход между участками цикла магнитного поля ($t_i = t$ — текущее время)

Как упоминалось, источники управляются «+» и «-» сериями импульсов. Приход одного импульса серии вызывает увеличение (для «+» серии) или уменьшение (для «-» серии) соответствующей функции на минимально принятую величину (квант).

В итоге для управления этими источниками требуются следующие наборы серий.

1. Набор серий для формирования главного тока $I_0(t)$. Ток формируется источником ИП1 ПИТ11, который управляется сериями, описывающими форму тока, и сериями, описывающими его производную. Зададим цену одного импульса в сериях, описывающих форму главного тока. Принимаем в качестве такого кванта значение $\Delta i = 0,01$ А. Так как максимальная скорость роста тока $\Delta I_0/\Delta t = 7000$ А/с, то максимальная частота следования импульсов равна 0,7 МГц. Как было сказано выше, кроме подачи на источник серии также подаются на ЦАП для получения аналогового сигнала, используемого в диагностике. Для отображения с точностью до одного кванта при максимальном токе 10 кА потребуется отобразить число 1 000 000, что возможно лишь с помощью 20-разрядного ЦАП. Можно использовать разработанный Analog Devices AD5791, но допустимо разделить исходную серию на четыре и использовать применяемый в циклозадающей системе нуклотрона 18-разрядный ЦАП. Тогда аналоговый сигнал на выходе отобразится с точностью 0,04 А, что приемлемо. Так как скорость изменения производной тока может достигать 140 000 А/с², то достаточно принять цену импульса серии для производных тока 0,05 А/с, тогда максимальная частота в серии не превысит 2,8 МГц, что укладывается в допустимые значения для источника. При получении соответствующего аналогового сигнала ЦАП максимальное отображаемое значение составит 140 000, что требуется для 18-разрядного ЦАП.

2. Серии для формирования тока в добавочных обмотках линз Ф и Д ($I_1(t)$). Ток формируется источником ИП2 ПИТ06, управляемым сериями, описывающими зависимость от времени коэффициента пропорциональности $k_1(t)$ между токами I_0 и I_1 . Для задания параметров серий потребуем, чтобы максимальное значение коэффициента $k_1 = 0,06$ устанавливалось за 100 мс, и примем максимальную частоту в серии 3 МГц, т.е. 300 000 импульсов за 100 мс. Тогда цена одного импульса составит $\Delta k_1 = 0,0000002$. Примем с запасом в качестве кванта значение $\Delta k_1 = 0,00000025$, тогда максимальная частота импульсов в серии будет 2,4 МГц.

3. Серии для формирования тока в добавочных обмотках линз Д ($I_2(t)$). Ток формируется источником ИП3 ПИТ03, управляемым сериями, описывающими зависимость от времени коэффициента пропорциональности $k_2(t)$ между токами I_0 и I_2 . Хотя максимальное значение $k_2 = 0,03$ существенно меньше, чем k_1 , ради стандартизации сохраним и для k_2 цену одного импульса серии $\Delta k_2 = 0,00000025$. Максимальная частота импульсов F_{\max} в этом случае составит 1,2 МГц.

Таблица 2. Параметры серий импульсов, управляющих источниками токов

Источник тока	Описываемая сериями функция	Цена импульса	F_{\max} импульсов в серии, МГц	Разрядность ЦАП
ИП1 ПИТ11	Главный ток $I_0(t)$	0,01 А ($\approx 0,02$ Гс)	0,7	18-разрядный (для точного отображения требуется 20 бит)
	Первая производная $I_0(t)$	0,04 А/с	2,8	16-разрядный (для точного отображения требуется 18 бит)
ИП2 ПИТ06	Коэффициент пропорциональности $k_1(t)$ между $I_0(t)$ и током ИП2	0,00000025	2,4	Аналоговый сигнал не требуется
ИП3 ПИТ03	Коэффициент пропорциональности $k_2(t)$ между $I_0(t)$ и током ИП3	0,00000025	1,2	

Описанные результаты приведены в табл. 2.

Кроме того, необходимо иметь информацию о виде заданных зависимостей токов $I_1(t)$ и $I_2(t)$, чтобы сравнивать их с реальными токами, полученными от источников ИП2 и ИП3. С этой целью два программируемых таймера вырабатывают две пары последовательностей серий «+» и «-», описывающих заданные зависимости $I_1 = k_1(t) I_0(t)$ и $I_2 = k_2(t) I_0(t)$. Эти серии поступают на входы двух 16-разрядных ЦАПов, на выходе которых получаем требуемые аналоговые сигналы. Так как максимальное значение токов предполагается равным до 600 А, то цена одного импульса должна быть больше чем $600/65536 \approx 0,0092$ А. Примем в качестве цены значение 0,01 А. При этом максимальная частота в сериях составляет 0,2 МГц и 0,1 МГц для I_1 и I_2 соответственно. Данные серий приведены в табл. 3. Напомним, что на источники ИП1 и ИП2 подаются серии, описывающие зависимости $k_1(t)$ и $k_2(t)$.

Таблица 3. Параметры серий импульсов, описывающих добавочные токи $I_1(t)$ и $I_2(t)$

Описываемая сериями функция	Цена импульса, А	F_{\max} импульсов в серии, МГц	Разрядность ЦАП
$I_1(t) = k_1(t) I_0(t)$	0,01	0,2	16-разрядный
$I_2(t) = k_2(t) I_0(t)$	0,01	0,1	16-разрядный

Отображение результатов. Указанные серии $I_0(t)$, $I'_0(t)$, $I_1(t)$ и $I_2(t)$ поступают на входы регистраторов временных спектров (РТС), тактируемых внутренним генератором с частотой 1 кГц, т. е. в памяти блока фиксируются спектры серий с шагом 1 мс. Для отображения задаваемого вида сигналов $I_0(t)$, $I'_0(t)$, $I_1(t)$ и $I_2(t)$ необходимо 8 входных каналов РТС (устройства $rts_chan0 \div rts_chan8$). Всего предусмотрено 16 таких каналов (устройства $rts_chan0 \div rts_chan15$), что позволяет фиксировать и отображать еще четыре сигнала, заданных в виде последовательности «+» и «-» серий. В частности, при наличии В-таймера, GF- и GD-таймеров можно фиксировать и отображать полученную зависимость от времени главного поля и градиентов Φ и D в том же масштабе, что и задающие серии. Оставшиеся два незадействованных входных канала РТС являются тогда резервными, для отображения какой-либо зависимости, заданной в виде «+» и «-» серий. В паузах циклов информация с РТС считывается и отображается на мониторе.

Кроме того, имеется ряд аналоговых сигналов, определяющих работу системы и поэтому требующих отображения. К ним относятся снимаемые с соответствующих датчиков значения напряжения на основной обмотке и 1-й и 2-й дополнительных обмотках, а также значения тока в этих обмотках и др. Эти сигналы поступают на входы 16-канального диджитайзера. В цикловых паузах информация с диджитайзера считывается и отображается на мониторе.

Выдача синхроимпульсов. Циклозадающая система выполняет также функции выдачи импульсов, привязанных к определенным моментам цикла магнитного поля (цикловых синхроимпульсов). Всего предусмотрено 24 таких импульса. Их выдача осуществляется программируемым генератором синхроимпульсов. В правой нижней части диалогового окна (см. рис. 2) расположена таблица синхроимпульсов. По приходу стартового импульса в блоке ведется отсчет импульсов внутреннего генератора с частотой 1 МГц. В каждый 32-битный канал 24-канального регистра записывается номер импульса внутреннего генератора, по приходу которого выдается требуемый синхроимпульс на соответствующий выход блока. Таким образом, точность времени выдачи синхроимпульсов равна 1 мкс. Пользователь задает число синхроимпульсов, и в таблице заданных синхроимпульсов нужно ввести номер участка цикла и время от начала этого участка, когда следует выдавать соответствующий синхроимпульс (например, момент старта выводной системы и т. д.). Число заказанных синхроимпульсов не может превышать 8. Заданные импульсы выдаются, начиная с выхода № 23 блока (но не ниже № 17 блока). Остальные импульсы имеют постоянную привязку к определенной фазе цикла, и времена их выдачи недоступны для модификации. На 0-й и 1-й выходы блока всегда выдаются импульсы начала и конца активной части цикла. На остальные выходы блока выдаются: начало 1-го участка, начало перехода ко 2-му участку, начало 2-го участка, начало перехода к 3-му участку и т. д. до заполнения всех ячеек, свободных от заказанных импульсов.

Временная фиксация событий. Во время выполнения цикла происходят события, момент наступления которых необходимо определить (импульсы инъекции, момент срабатывания той или иной защиты и т. д.). Эту функцию выполняют два 8-канальных счетчика. Счетчики работают по следующей схеме. По стартовому импульсу стартует внутренний генератор с частотой 1 МГц. На каждом из каналов счетчика осуществляется счет поступающих с генератора импульсов. В момент выполнения того или иного события на соответствующий канал поступает импульс, останавливающий счет на соответствующем канале. В паузе цикла данные со счетчиков читаются и с точностью до 1 мкс определяется время наступления того или иного события. При этом один 8-канальный счетчик фиксирует сигналы, по приходу которых должно быть заблокировано выполнение цикла. Соответствующее устройство имеет следующие атрибуты: 1) вектор `ULONG interlock_time` [8], куда записываются отсчитываемые от стартового импульса времена прихода на соответствующие входы блокирующих цикл сигналов; 2) вектор `Boolean interlock_status` [8] (если значение i -го элемента этого массива равно `TRUE`, то это означает, что на i -й канал поступил блокирующий цикл сигнал); 3) вектор `Boolean interlock_mask` [8], значения элементов этого вектора (`TRUE` или `FALSE`) задаются в диалоговом окне в таблице разрешения блокировок (справа внизу, см. рис. 2). Если значение i -го элемента этого массива равно `FALSE`, то это означает, что сигнал блокировки цикла, поступающий на i -й канал, цикл не блокирует. Второй 8-канальный счетчик лишь фиксирует момент поступления на соответствующий канал внешнего импульса, поэтому соответствующее устройство не нуждается в устройстве разрешения блокировок.

Последовательность операций управляющей программы и обмен данными. В устройстве «server» системы TANGO хранятся последние выполненные данные, определяющие зависимость главного магнитного поля и градиентов квадрупольных линз от времени, а также режим работы циклозадающей аппаратуры. При запуске программы эти данные перезаписываются из системы TANGO, затем на их основе вычисляются данные для элементов циклозадающей системы (параметры управляющих и контролируемых серий, режимы работы электронных блоков и т. д.) и записываются в устройство «server» TANGO соответствующих электронных блоков. Затем происходит перезапись этих данных в физические устройства и программа выдает команду «старт», по которой система начинает работать. В процессе работы программа постоянно проверяет статус генератора серий главного тока. Если генератор находится в состоянии паузы, происходит чтение данных из блоков РТС, счетчиков и диджитайзера, а также информация о выполненном цикле выдается на мониторы. Вид рабочего окна программы показан на рис. 4.

В верхней части окна находится главное меню. Кнопка «параметры цикла» — это вход в диалоговое окно (см. рис. 2). Кнопка «вид» — вход

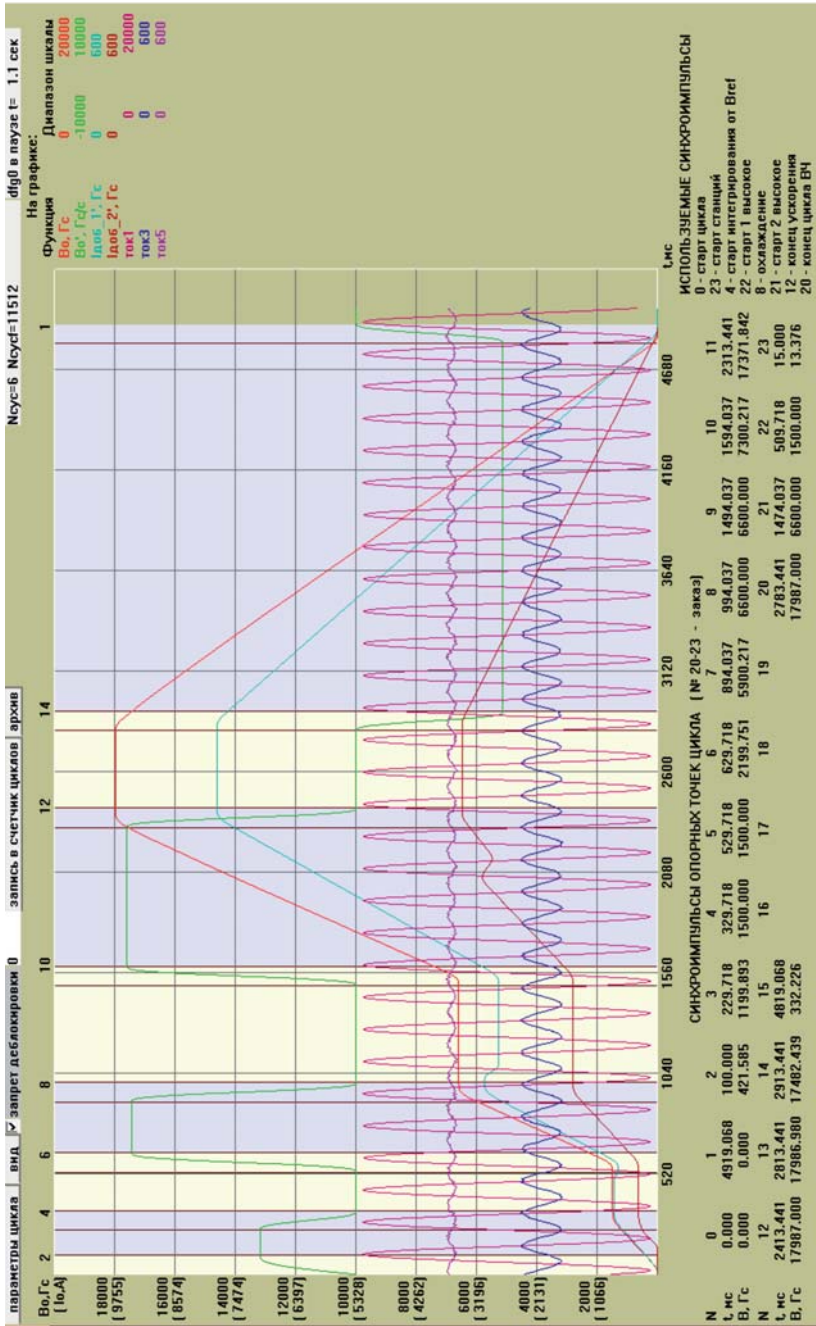


Рис. 4. Рабочее окно программы управления циклом

в окно формы представления. В нем задаются набор выводимых на монитор графиков и масштабы для них. Масштаб по времени — один для всех представляемых функций, а по значениям задается для каждой функции индивидуально. Заданный оператором набор функций, диапазон по значениям и цвет на графике для каждой из них показаны в таблице справа вверху. В приведенном примере на экран выдаются полученные из РТС формы главного тока (главного магнитного поля), его производной и токов в двух дополнительных обмотках, а также полученные из диджитайзера зависимости от времени трех сигналов (ток1, ток3 и ток5).

При срабатывании какой-либо защиты происходит блокировка цикла. При снятии сигнала защиты цикл тем не менее не восстанавливается автоматически. Для восстановления цикла необходимо снять метку на кнопке «запрет деблокировки» (см. рис. 4). После восстановления цикла метка на кнопке восстанавливается автоматически. На экран выдается число циклов, обработанных программой с момента ее старта (N_{cyc}), и число циклов, выполненных с момента начала работы генератора серий для главного тока или с момента принудительной записи в регистр этого блока заданного значения (N_{cycf}). Следует отметить, что N_{cycf} увеличивается на единицу с каждым выполненным циклом, независимо от работы программы, а N_{cyc} обнуляется при каждом запуске задачи, при этом при входе в какое-нибудь диалоговое окно N_{cyc} не меняется (обработка циклов во время выполнения меню не производится). Значению N_{cycf} может быть принудительно присвоено любое значение с помощью кнопки меню «запись в счетчик циклов».

В крайнем правом углу находится окно, куда выводится текущее состояние генератора серий главного тока ($dfg0$ в паузе или $dfg0$ в работе), а также время нахождения генератора в этом состоянии (в секундах). Таблица под графиком представляет собой список выдаваемых синхроимпульсов. В верхней строке таблицы приводится номер выхода генератора синхроимпульсов, с которого снимается соответствующий импульс, в следующей строке — время от начала цикла выдачи соответствующего импульса (в миллисекундах), а в 3-й строке — магнитное поле (в гауссах) в этот момент. Под графиком показаны положения синхроимпульсов на шкале времени, а справа от таблицы приведен перечень используемых синхроимпульсов с описанием их назначения.

Эпизодически происходит запись этой информации в архивный файл. Запись данных в этот файл происходит также при срабатывании защиты и по команде оператора нажатием кнопки «архив» главного меню. Все данные последнего выполненного цикла в двоичном виде записываются в файл `Booster_field_yy_mm.dat`, где `yy` — год, `mm` — месяц. При первой записи данных в очередном новом месяце такой файл создается автоматически. Обслуживание архива осуществляется программой, имеющей доступ к архиву данных как нуклотрона, так и бустера.

При запросе «параметры цикла» происходит вход в диалоговую часть программы. При выполнении команды диалогового меню «выполнить» происходит перезапись диалоговых величин в выполняемые, затем эти данные записываются в устройство «server» TANGO и выполняется последовательность действий, как и при запуске задачи. Данные второго цикла после начала работы системы с измененными данными записываются в архивный файл.

Получено 21 мая 2019 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 04.07.2019.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 180 экз. Заказ № 59734.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/