

01;10

Алгоритм обработки информации о характеристиках излучений импульсного ускорителя электронов

© Д.М. Иващенко, Н.Г. Мордасов, А.М. Членов, В.Д. Шиян

Научно-исследовательский институт приборов,
140080 Лыткарино, Московская обл., Россия
e-mail: risi@tsr.ru

(Поступило в Редакцию 15 мая 2006 г.)

Сформулированы условия, разработан метод, алгоритмы фильтрации и синхронизации разнесенных во времени массивов цифровой информации об обусловленных быстро протекающих процессах, используемых для оперативного дозиметрического обеспечения радиационных испытаний на ускорителях одиночных импульсов и диагностики их режима работы.

PACS: 07.05.Kf, 29.27.-a

Введение

Одной из важнейших задач радиационной физики является исследование работоспособности образца в условиях высокой интенсивности ионизирующего излучения и дозовой нагрузки. В лабораторных условиях эти задачи решаются с помощью высокоточных ускорителей электронов различного принципа действия (линейные, прямого действия), работающих в режиме вывода тормозного излучения одиночными импульсами [1–4].

Характерной особенностью работы подобных ускорителей является невысокая воспроизводимость временных и спектрально-энергетических характеристик ионизирующего излучения, обусловленная ограниченными возможностями контроля и поддержания в них предельного режима электрофизических процессов [5].

В условиях высокоинтенсивного импульсного электронного или тормозного излучения известные первичные измерительные преобразователи для определения спектральных характеристик имеют ограниченные возможности, при этом существенно возмущают поле излучения в плоскости облучения испытываемого образца вследствие массивности и громоздкости [3,6,7].

Современная практика пока не располагает прямыми и невозмущающими методами измерения спектральных характеристик высокоинтенсивного электронного или тормозного излучений на выходе подобных ускорителей. Для решения этой задачи в последнее десятилетие устойчиво развиваются косвенные методы, основанные на измерениях характеристик мощности дозы тормозного излучения и тока пучка электронов в заданной геометрии измерений [8,9]. О временном распределении энергии электронов на входе в мишень-конвертер в импульсе судят по отношению мощности дозы в локальной точке поля на оси транспортировки пучка к току пучка электронов, определяемом как ее динамическая передаточная характеристика, при известных параметрах сечения пучка, углового распределения электронов и характеристики мишени-конвертера. При известных спектральных, потоковых, угловых характеристиках

электронов в плоскости мишени-конвертера и ее параметрах энергетический спектр тормозного излучения в плоскости облучения образца определяется численными методами.

Эти методы наиболее актуальны в условиях реализации технологии радиационных испытаний образцов. Они позволяют автоматизировать в комплексе как дозиметрическое обеспечение радиационных испытаний посредством определения интегральных и динамических, спектрально-энергетических характеристик тормозного излучения в плоскости облучения образца при работе ускорителя в режиме генерации тормозного излучения, так и диагностику режима работы ускорителя по интегральным и динамическим, спектрально-энергетическим и потоковым характеристикам пучка электронов в плоскости мишени-конвертера.

Создание автоматизированных информационно-измерительных систем, решающих комплексные проблемы экспрессного дозиметрического обеспечения испытаний, например, радиоэлектронной аппаратуры и ее компонент на радиационную стойкость и диагностики режима работы мощного ускорителя одиночных импульсов, на настоящее время считается нетривиальной задачей.

Разработанная методология комплексной диагностики характеристик пучка электронов и тормозного излучения подобных ускорителей, работающих в режиме генерации тормозного излучения, основана на определении статической и динамической передаточных характеристик мишени-конвертера как измерительного преобразователя для используемого режима работы ускорителя [5,8,10]. По своей эффективности она зависит от качества получаемой информации с первичных преобразователей тока пучка на входе в мишень, мощности дозы тормозного излучения в изодозовой плоскости облучения образца и синхронизации массивов этой информации на идеализированной временной оси с целью дальнейшей обработки. В идеальном случае для реализации методологии необходимо обработать как минимум две синхронизованные осциллограммы

(тока пучка и мощности дозы тормозного излучения), полученные в условиях проявления связанных и обусловленных процессов в мишени-конвертере с помощью пространственно разнесенных первичных измерительных преобразователей, в зависимости от выбранной геометрии облучения образца. На основе этих измерительных преобразователей формируются основные каналы измерительно-информационной системы, определяющие временные характеристики электрических аналогов тока пучка электронов в плоскости мишени-конвертера и мощности дозы тормозного излучения в плоскости изодозового облучения исследуемого образца [11].

Достоверность информации с измерительного канала обусловлена его статическими и динамическими параметрами, а также шумом аналогово-цифрового преобразователя, сопутствующими электромагнитными наводками, нестабильностью нулевой линии регистратора и т.п. [12].

Априорная информация и условия реализации методов

Основной проблемой в реализации методов автоматизированного определения спектрально-энергетических характеристик пучка электронов в плоскости мишени-конвертера и тормозного излучения ускорителей одиночных импульсов является синхронизация массивов цифровой информации, получаемой по измерительным каналам тока пучка электронов и мощности дозы тормозного излучения в реализуемой измерительной системе. При этом расстояние от мишени до формируемой плоскости облучения образца определяется в зависимости от прогнозируемых в эксперименте параметров воздействующих факторов. Изменяемая геометрия измерений мощности дозы тормозного излучения от импульса к импульсу приводит к изменению временного смещения между показаниями преобразователей тока и мощности дозы тормозного излучения при конечной скорости распространения тормозного излучения, которое не может быть корректно компенсировано электрическими методами.

В этом смысле представляет интерес метод синхронизации сигналов, основанный на физической интерпретации происходящих обусловленных процессов, отражаемых измерительными каналами. Поскольку временной сдвиг между сигналами первичных преобразователей зависит от геометрии измерений, то эта зависимость может быть обусловлена следующим набором требований для мощных ускорителей одиночных импульсов:

- временное разрешение измерительных каналов идентично и практически не влияет на форму импульса;
- мощность дозы тормозного излучения находится в прямой зависимости от тока пучка электронов;

— мощность дозы тормозного излучения находится в степенной зависимости от энергии электронов E^n ($n \geq 1$) [8];

— длительность импульса тока не менее длительности импульса мощности дозы тормозного излучения ($\tau_I \geq \tau_\gamma$);

— экстремумы в импульсах тока пучка электронов $I_{\text{esc}}(t)$ и мощности дозы тормозного излучения $P_\gamma(t)$ должны совпадать на идеализированной временной оси.

Эта информация необходима для проведения синхронизации импульсов, основанной на связи между рассматриваемыми физическими процессами, проявляющейся в условиях линейных ускорителей одиночных импульсов.

Как следует из анализа априорной информации для ускорителей прямого действия, в их диодном промежутке наблюдается предимпульс тока, обусловленный индуктивной связью, обеспечивающий формирование катодной плазмы, но усложняющий условия синхронизации [6]. При неизменном ускоряющем напряжении на диоде текущие экстремальные значения величин в импульсах тока и мощности дозы тормозного излучения должны совпадать на идеализированной временной оси процессов, регистрируемых измерительными каналами системы.

Исходя из общеизвестного характера изменения сопротивления диодного промежутка ускорителей прямого действия в режиме ускорения можно полагать, что в качестве дополнительной информации при синхронизации может быть использован характер изменения напряжения на диодном промежутке. Поскольку измерение напряжения на диодном промежутке по техническим причинам сложно реализовать без изменения характеристик диода, можно использовать временное распределение напряжения, измеряемое на входе в вакуумную передающую линию. В данном случае важно не абсолютное значение напряжения, а характер его изменения в импульсе. Характеристика изменения напряжения на входе в вакуумную передающую линию может быть определена посредством использования соответствующего емкостного делителя напряжения и организации измерительного канала напряжения U с использованием для синхронизации следующей дополнительной информации:

— импульс напряжения опережает токовый, а его длительность не менее длительности импульса тока τ_p ;

— временные параметры основных экстремумов импульса напряжения U могут совпадать с основными экстремумами импульса тока $I_{\text{esc}}(t)$ в противофазе или синфазно с экстремумами мощности дозы $P_\gamma(t)$.

Таким образом, координаты пиков в импульсах $U(t)$, $I_{\text{esc}}(t)$ и $P_\gamma(t)$ на идеализированной временной оси должны иметь высокие коэффициенты корреляции, определяющие критерий синхронизации информации, получаемой с измерительных каналов.

Выходные параметры ускорителя

Режим работы	I_{esc} , kA	τ_n , s	E_e , MeV	\bar{E}_γ , MeV	P_γ , Gy · s ⁻¹
1	60	$6-10 \cdot 10^{-8}$	4-4.5	1	$2 \cdot 10^{10}$
2	45	$2 \cdot 10^{-6}$	2	0.6	$3.5 \cdot 10^8$

Постановка эксперимента

Эксперименты проводились на ускорителе электронов прямого действия УИН-10 с энергией электронов E_e и средней энергией тормозного излучения \bar{E}_γ , режимы работы которого представлены в таблице.

Сигналы с первичных измерительных преобразователей, формирующих электрические аналоги P_γ , I_{esc} , U , поступают по измерительным каналам на устройство регистрации — цифровой осциллограф типа Tektronix TDS-3054B, где происходит оцифровка сигналов. Между цифровым осциллографом и вычислительной машиной организован канал управления и передачи информации.

На рис. 1 приведены типовые формы импульсов с рассматриваемых измерительных преобразователей ускорителя прямого действия УИН-10, полученные в условиях синхронизованного запуска измерительных каналов с идентичными по длине линиями связи.

Сигналы являются зашумленными (наводки на кабельных линиях связи, шумы аналогово-цифрового преобразователя и его конечное временное разрешение) и несинхронизованными. Ставится задача отфильтровать исходные сигналы от шумов, при необходимости восстановить реальные формы импульсов и синхронизовать их, т.е. создать условия для дальнейшей обработки цифровых массивов информации по задаваемому алгоритму и получению новой информации. Весь процесс обработки экспериментальных данных должен протекать в автоматическом режиме.

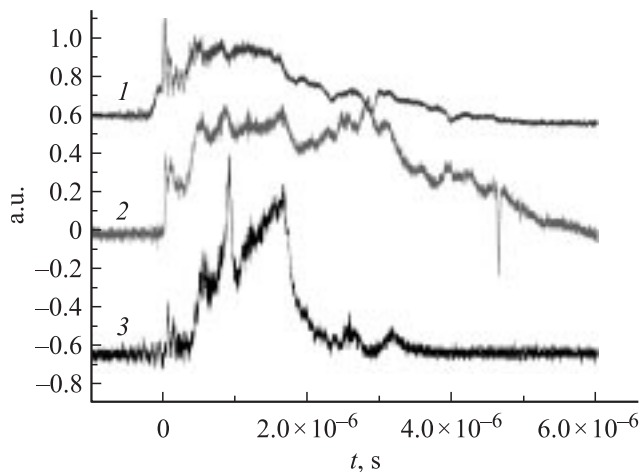


Рис. 1. Типовые формы сигналов измерительных каналов: 1 — напряжения U на входе в вакуумную передающую линию, 2 — тока I_{esc} , 3 — мощности дозы P_γ .

Методы фильтрации и синхронизации

При решении поставленной задачи использовались методы математической статистики — анализ временных рядов и прогнозирование [13,14]. Фильтрация шумов от сигнала может быть решена с помощью процедуры сглаживания. Удобным способом является аппроксимация экспериментальных данных сплайнами методом наименьших квадратов.

Пусть на временной сетке $t = 1, \dots, n$ заданы измеренные значения $\{X_i\} = f_1, f_2, \dots, f_n$ некоторой гладкой функции. Требуется найти дважды непрерывно дифференцируемую функцию $s(t)$, которая минимизирует функционал $\int_{X_i}^{X_n} \{s(t)\}^2 dt$ среди всех функций $s(t)$ при наложенных ограничениях

$$\sum_i^n [\{s(t_i) - f_i\}/w_i]^2 \leq \sigma, \quad (1)$$

где w — весовая функция задания экспериментальных данных; f — экспериментальные данные; σ — параметр сглаживания.

Применяя метод наименьших квадратов, получим сглаживающий кубический сплайн, который в каждом интервале (t_i, t_{i+1}) представляется в виде

$$s(t) = c_{3i}h^3 + c_{2i}h^2 + c_{1i}h + y_i; \quad h = t - t_i, \quad (2)$$

где c_{3i}, c_{2i}, c_{1i} — коэффициенты кубического сплайна при $i = 1, 2, \dots, n-1$; y_i — значения сплайна в узлах t_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

При известной оценке стандартного отклонения ошибки измерения (STD), которую можно взять в качестве весовой функции w , сглаживающий параметр σ выбирается из доверительного интервала

$$n - \sqrt{2n} \leq \sigma \leq n + \sqrt{2n}.$$

Задача определения степени сглаживания экспериментальных данных осложняется тем, что для разных каналов получаются разные STD и необходимо их согласовать. При этом небольшая вариация в задании STD (рис. 2) приводит к радикальному изменению вида сглаживающего сплайна (при заниженном значении STD сглаженный сигнал продолжает содержать шум, а при завышенном происходит потеря полезной информации из-за чрезмерного сглаживания).

Полагая, что измеряемые функции описывают единый физический процесс, при котором они связаны монотонной зависимостью, потребуем, чтобы количество экстремумов сплайн-аппроксимации данных измерительных каналов было приблизительно адекватным, при этом сглаженные результаты регистрации должны содержать набор наиболее характерных экстремумов. При автома-

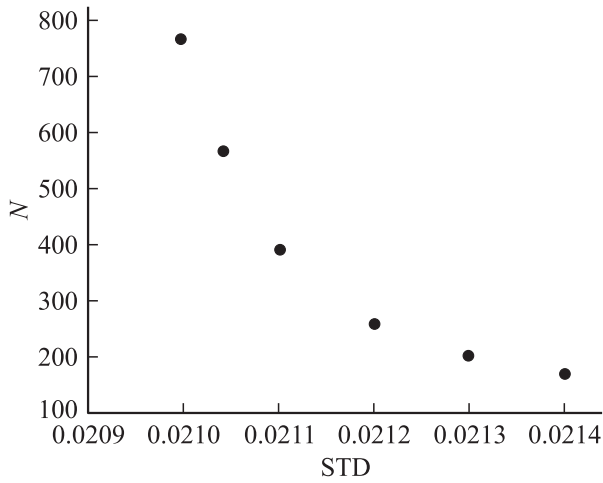


Рис. 2. Зависимость количества максимумов N сглаживающего сплайна от заданного стандартного отклонения STD (канал P_γ).

тизированной обработке можно поступить следующим образом:

- задать допустимый интервал (N_1, N_2) количества максимумов сглаженных функций;
- для каждого p -го канала решить нелинейное уравнение

$$(STD)_p \leq F(N); \quad N_1 \leq N \leq N_2, \quad (3)$$

где F — процедура определения количества максимумов N сплайна по заданному допустимому значению стандартного отклонения.

После этого найденные значения $(STD)_p$ используются для построения сплайн-аппроксимаций экспериментальных данных. Для рассматриваемого типового эксперимента на ускорителе в режиме 2 (см. таблицу) после решения уравнения (3) получалось, что оценка стандартного отклонения ошибки эксперимента (фильтрации) составляла для канала $P_\gamma \leq 2.4$, для $I_{esc} \leq 2.7$, а для $U \leq 2.1\%$.

В таком виде данные можно подвергнуть дальнейшей обработке. Рассмотрим в общем виде метод синхронизации каналов измерительной системы, осуществляемый в режиме преобразованного масштаба времени.

Пусть $\{X(t)\}$ обозначает временной процесс со средним $\mu = E[X(t)]$ и ковариацией

$$\begin{aligned} \sigma(k) &= \text{cov}\{X(t), X(t+k)\} \\ &= E\{[X(t) - \mu][X(t+k) - \mu]\}; \quad k \in R. \end{aligned} \quad (4)$$

Пусть $\{X_t\}$ обозначает дискретный временной процесс, полученный в результате оцифровки со средним μ_X и дисперсией $\sigma_{XX}(k)$, $t = 1, \dots, n$.

Пусть также $\{Y_t\}$ обозначает дискретный временной процесс, полученный в результате оцифровки со средним μ_Y и дисперсией $\sigma_{YY}(k)$, $t = 1, \dots, n$.

Обозначим функцию взаимной ковариации между X_t и Y_t

$$\sigma_{XY}(k) = \text{cov}\{[X_t - \mu_X][Y_{t+k} - \mu_Y]\}; \quad k \in ZZ. \quad (5)$$

Тогда функция взаимной ковариации выборок $\tilde{\sigma}_{XY}(k)$ может быть представлена в следующем виде:

$$\tilde{\sigma}_{XY}(k) = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} \{[X_t - \tilde{\mu}_X][Y_{t+k} - \tilde{\mu}_Y]\}; & k = 0, 1, \dots, (n-1); \\ \frac{1}{n} \sum_{t=1-k}^n \{[X_t - \tilde{\mu}_X][Y_{t+k} - \tilde{\mu}_Y]\}; & k = -1, -2, \dots, (n-1), \end{cases} \quad (6)$$

где k — положительная или отрицательная задержка между дискретными временными процессами $\{X_t\}$, $\{Y_t\}$.

Если предположить, что максимальное значение функции $\sigma_{XY}(k)$ соответствует задержке k , которая обеспечивает синхронизацию процессов $\{X_t\}$ и $\{Y_t\}$, то зависимость (6) можно использовать для расчета этой задержки. Более удобно пользоваться функциями взаимной корреляции между каналами, выражаемой в следующем виде:

$$\tilde{\rho}_{X_j Y_j}(k) = \frac{\tilde{\sigma}_{X_j Y_j}(k)}{[\tilde{\sigma}_{X_j}(0)\tilde{\sigma}_{Y_j}(0)]^{1/2}}; \quad k = 0, \pm 1, \dots, \pm K. \quad (7)$$

Здесь для нормировки использованы оценки дисперсии каналов $j = 1, 2, \dots, p$ при $k = 0$

$$\tilde{\sigma}_{X_j}(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_{tj} - \tilde{\mu}_{X_j})^2; \quad j = 1, 2, \dots, p. \quad (8)$$

Расчитанные для различных интервалов временного ряда коэффициенты корреляции каналов позволяют оценить уровень корреляции регистрируемых сигналов в этих временных диапазонах.

Проведенные расчеты по типовым импульсам, полученным с измерительных каналов, показали, что для целей синхронизации достаточно использовать не весь временной ряд, а только его часть. Эта часть определяется от начала работы вакуумного диода ускорителя и заканчивается с длительностью импульса мощности дозы тормозного излучения. В качестве примера на рис. 3 приведены графики зависимости взаимной корреляции $\rho_{XY}(k)$ для пар (P_γ, I_{esc}) , (P_γ, U) , (I_{esc}, U) .

Необходимо отметить высокую корреляцию между временными аналогами импульсных процессов, характеризующих выходные характеристики ускорителя (P_γ, I_{esc}) при автоматизированном выборе задержки, обусловленной пространственно разнесенными первичными преобразователями.

Максимальное значение коэффициента корреляции ρ импульсов P_γ, I_{esc} (рис. 1) равно 0.86 и достигается при $k = -23$, что соответствует временной задержке

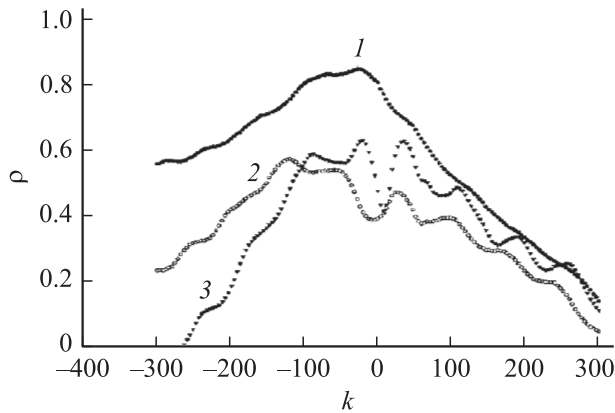


Рис. 3. Коэффициенты взаимной корреляции сигналов как функции задержки: 1 — $\rho(P_\gamma, I_{\text{esc}})$, 2 — $\rho(P_\gamma, U)$, 3 — $\rho(I_{\text{esc}}, U)$.

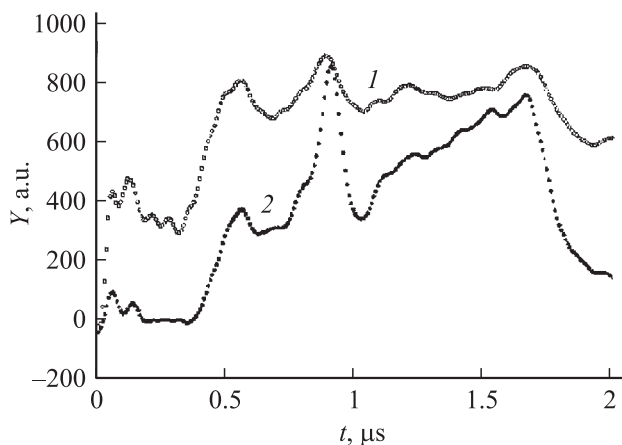


Рис. 4. Фильтрованные и синхронизированные сигналы основных измерительных каналов: 1 — I_{esc} , 2 — P_γ .

$\approx 10^{-8}$ s при шаге дискретизации $0.4 \cdot 10^{-9}$ s. Аналогичные распределения коэффициентов взаимной корреляции наблюдаются и для других режимов работы ускорителя.

Таким образом, по наиболее значащим неоднородностям временных процессов в импульсах P_γ , I_{esc} , U ускорителя и оптимальной величине их корреляции можно определить временной сдвиг в регистрируемых физических процессах. Метод позволяет независимо от выбранной геометрии измерений обусловленных, разнесенных по времени регистрации физических процессов, представить их на идеализированной временной оси в режиме преобразованного масштаба времени, удобного для проведения дополнительных операций с оцифрованными массивами информации и получения новой информации.

Полученная в результате фильтрации и синхронизации информация с измерительных каналов тока и мощности дозы тормозного излучения приведена на рис. 4. В частности, интерес представляет определение динамической передаточной характеристики мишени-

конвертера $P_T(t)$, отражающей данные о временной зависимости эффективной энергии электронов пучка ускорителя УИН-10 в плоскости мишени-конвертера и выражаемой следующей зависимостью:

$$P_T(t) = P_\gamma(t)/[I_{\text{esc}}(t)K(x)], \quad (9)$$

где $K(x)$ — коэффициент ослабления пикового значения мощности дозы тормозного излучения в плоскости облучения образца, расположенного на расстоянии x от мишени-конвертера на оси транспортировки пучка электронов относительно условий градуировки измерительной системы.

Информация о динамической передаточной характеристике мишени-конвертера ускорителя при известной ее статической передаточной характеристике позволяет определить следующие интегральные и динамические спектрально-энергетические и потоковые характеристики как пучка электронов в плоскости мишени-конвертера, ток и тормозного излучения в плоскости облучения образца [8]:

- распределение потока электронов в импульсе;
- распределение энергии электронов в импульсе;
- распределение мощности пучка электронов в импульсе;
- энергетический спектр электронов за любой промежуток времени в импульсе;
- распределение мощности дозы тормозного излучения в импульсе в плоскости исследуемого образца;
- поглощенную дозу тормозного излучения в плоскости исследуемого образца;
- энергетический спектр тормозного излучения за импульс и за любой промежуток времени в импульсе излучения в плоскости облучаемого образца.

При этом для определения спектральных характеристик тормозного излучения в плоскости облучаемого образца необходимо учитывать угловые характеристики электронов пучка на входе в мишень-конвертер.

Вывод

Разработанный комплексный метод и алгоритмы программной фильтрации экспериментальной информации от наложенного „шума“ регистрации с использованием сглаживающего кубического сплайна, а также синхронизации информации об обусловленных процессах с разнесенной в пространстве регистрацией на основе определения функции взаимной корреляции экстремумов в импульсах обладают высокой эффективностью на фоне погрешности каналов измерительной системы и экспрессностью. Получаемая на их основе информация метрологически достоверна и позволяет определять как спектрально-энергетические и потоковые характеристики пучка электронов в плоскости мишени-конвертера, так и тормозное излучение в плоскости облучаемого образца. Время программной обработки информации по

разработанным алгоритмам фильтрации и синхронизации измеряемых характеристик в импульсе ускорителя не превышает 1.5–2 min.

Список литературы

- [1] Дьянков В.С., Кормилицын А.И. // ВАНТ. Сер. ФРВРЭА. 1996. Вып. 1–3. С. 203–210.
- [2] Брыксин В.А., Иващенко Д.М., Каменский В.А. и др. // ВАНТ. Сер. ФРВРЭА. 1999. Вып. 3–4. С. 100–105.
- [3] Брюков Б.В., Герасимов А.И., Гончаров А.С. и др. // ВАНТ. Сер. ФРВРЭА. Вып. 3. С. 51–57.
- [4] Quintenz J.P. // Proc. of 15th Int. Conf. on High-power Particle Beams. St. Petersburg, July 18–23, 2004.
- [5] Мордасов Н.Г. Создание систем мониторинга характеристик полей ионизирующих излучений ускорителей при радиационных испытаниях. Автореф. докт. дис. М., 2005. 40 с.
- [6] Соковнин С.Ю. // ПТЭ. 1992. № 4. С. 125–130.
- [7] Куделин К.М. // ПТЭ. 1983. № 10. С. 5–10.
- [8] Мордасов Н.Г. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 2. С. 107–112.
- [9] Завада Н.И., Комаров П.Л., Донской Е.Н. и др. // Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов: Сб. науч. трудов. Саров, 1996. С. 84–96.
- [10] Мордасов Н.Г., Иващенко Д.М., Членов А.М. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 9. С. 108–115.
- [11] Мордасов Н.Г., Кочергин В.В., Иващенко Д.М. // ВАНТ. Сер. ФРВРЭА. 2004. Вып. 3–4. С. 124–126.
- [12] Веретенников А.И., Горбачев В.М., Предеин Б.А. Методы исследования импульсных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1985. 152 с.
- [13] Reinsch C.H. // Num. Math. 1967. Vol. 10. P. 177–183.
- [14] Морозов В.А. // Вычислительные методы и программирование. 1970. Вып. XIV. С. 46–62.