

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 543.084.085: 541.12.084.085

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ
КВАДРУПОЛЬНОГО ФИЛЬТРА МАСС В ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ
ВЕРШИНАХ ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНИКА СТАБИЛЬНОСТИ
ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

М. В. Дубков, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-5791-0991, e-mail: dubkov.m.v@rsreu.ru

М. А. Буробин, к.т.н., доцент, доцент кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4465-6362, e-mail: burubin.mikhail@yandex.ru

В. В. Иванов, к.т.н., доцент кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-5655-0111, e-mail: vladimir.nvi@gmail.com

К. А. Ветшев, аспирант кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0000-7789-7520, e-mail: pro100kirik01@gmail.com

А. Д. Рубцова, аспирант кафедры ОиЭФ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0004-0215-908x, e-mail: adr1999@list.ru

Исследуются особенности работы квадрупольного фильтра масс в верхней и нижней вершинах четырехугольника стабильности при импульсном питании и наличии в распределении потенциала составляющих высших порядков.

Целью работы является сравнение влияния различных составляющих высших порядков на аналитические характеристики квадрупольного фильтра масс при работе в верхней и нижней вершинах четырехугольника стабильности с применением импульсного питания. Методами численного моделирования проведено сравнение особенностей работы квадрупольного фильтра масс как при отсутствии, так и при наличии в распределении потенциала составляющих высших порядков.

Показано, что с ростом разрешающей способности увеличивается отношение интенсивностей массовых пиков при работе в нижней и верхней вершинах соответственно. Также при наличии в распределении потенциала определенных составляющих высших порядков, связанных с симметричными искажениями электродной системы, возрастает разрешающая способность фильтра масс, как в верхней, так и в нижней вершинах четырехугольника стабильности.

Ключевые слова: квадрупольный фильтр масс, четырехугольник стабильности, составляющие высших порядков, массовый пик, разрешающая способность, интенсивность массового пика.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-162-171

Введение

Масс-спектрометрические методы исследования состава вещества, основанные на разделении потоков заряженных частиц в электрическом и магнитном полях, в настоящее время получили широкое распространение. Они дают информацию как о структуре, так и о количественном составе исследуемых проб. При этом наибольшей экспрессностью анализа обладают динамические масс-спектрометры, среди которых широкое распространение как в промышленности, так и в научных исследованиях получили квадрупольные масс-анализаторы, основанные на разделении потоков заряженных частиц в переменных электрических полях.

Принцип сортировки заряженных частиц в квадрупольном фильтре масс, предложенный В. Паулем в 1953 г., основан на разделении движущихся заряженных частиц, имеющих раз-

ный удельный заряд, в переменном высокочастотном электрическом поле [1]. При этом в рабочем объеме масс-анализатора создается электрическое поле с квадратичным распределением потенциала, для формирования которого используется система четырех электродов.

Для создания сортирующего электрического поля с квадратичным распределением потенциала может использоваться как синусоидальное, так и импульсное радиочастотное питание [2], форма которого изображена на рисунке 1.

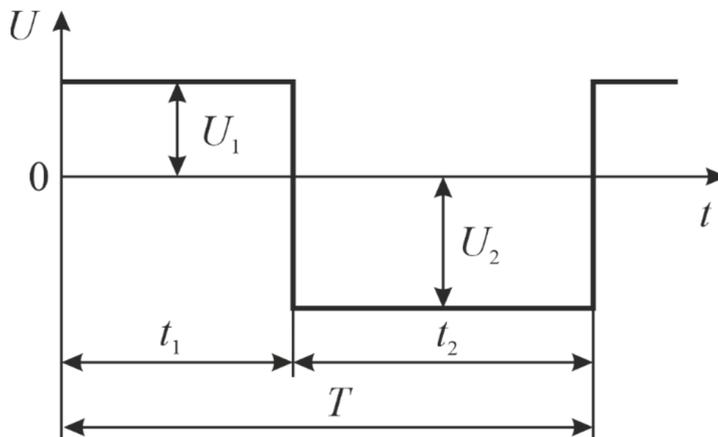


Рисунок 1 – Форма импульсного радиочастотного сигнала
Figure 1 – RF pulse waveform

Движение заряженных частиц в этом случае описывается уравнением Хилла [3]:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \psi(t)y = 0,$$

где y – любая из координат; $\psi(t)$ – периодическая функция с периодом T , вид которой определяется формой напряжения, питающего электроды анализатора.

Траектория движения заряженной частицы в квадрупольном фильтре масс (КФМ) может быть как стабильной (устойчивой), так и нестабильной, то есть неограниченно возрастающей, что отражается на соответствующей диаграмме стабильности (рисунок 2). Здесь $a_n = T\sqrt{\sigma\chi U_1}$, $q_n = T\sqrt{\sigma\chi U_2}$, $\sigma = e/m$ – удельный заряд частицы, $\chi = 2/r_0^2$, r_0 – минимальное расстояние от центра системы до полеобразующих электродов, называемое радиусом поля.

На диаграмме стабильности (рисунок 2) при импульсном питании со скважностью 2, выделяют соответствующие области стабильности [4] – зона 1-1 и зона 2-1 и пр., в пределах которых решение уравнения Хилла ограничено в пространстве и, соответственно, траектории заряженных частиц стабильны. Традиционно работа квадрупольного фильтра масс осуществляется в вершине зоны 1-1 диаграммы стабильности. Однако, применение для анализа других зон стабильности, описанное в ряде статей [5-7], имеет некоторые преимущества. В частности, при работе в острове стабильности (рисунок 2, зона 2-1) не требуется применения каких-либо дополнительных устройств для удаления ионов с большими массами и может обеспечить более высокое разрешение, чем в первой зоне стабильности [8]. В работе [9] показана возможность и проведено сравнение работы квадрупольного фильтра масс в верхней (M) и нижней (S) вершинах четырехугольника стабильности при гармоническом питании.

Теоретически для получения идеального квадратичного распределения потенциала требуется создать бесконечные электроды с гиперболическим профилем. В реальных электродных системах такие электроды создать невозможно, поэтому они либо ограничиваются в пространстве, либо заменяются цилиндрическими электродами. При этом в распределении потенциала появляются составляющие высших порядков. В работах [10-12] проведено исследование только симметричных гексапольных и октапольных искажений электрического поля в электродных системах квадрупольного фильтра масс при гармоническом питании.

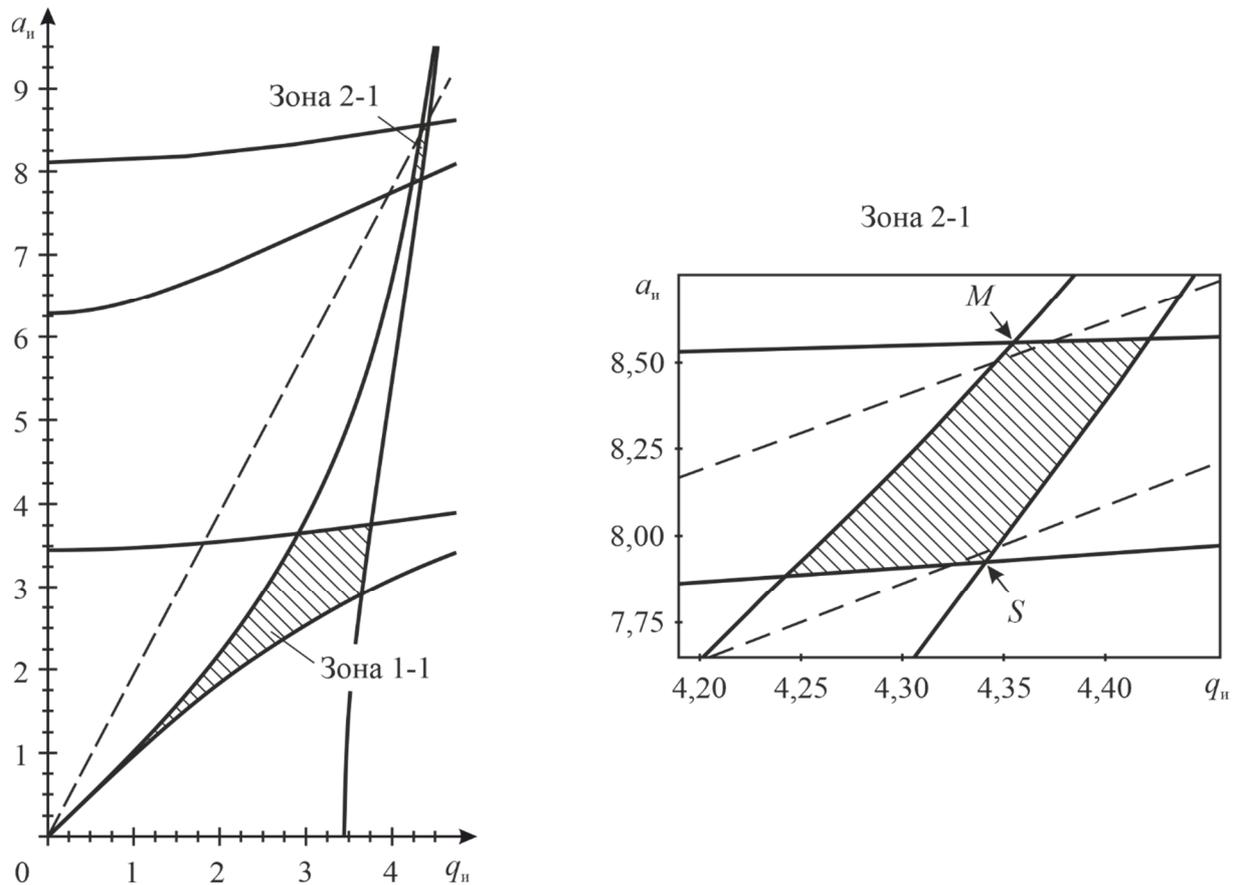


Рисунок 2 – Диаграмма стабильности квадрупольного фильтра масс при импульсном питании
 Figure 2 – Stability diagram of quadrupole mass filter with pulsed power supply

Однако в литературе не достаточно внимания уделено импульсному питанию квадрупольного фильтра масс, которое на современном этапе развития техники имеет ряд преимуществ. Это и использование генераторов с меньшими массогабаритными показателями, и более простое управление сигналом.

Кроме того, публикации, посвященные комплексному исследованию различных симметричных и несимметричных искажений электрического поля при работе квадрупольного фильтра масс в высших зонах стабильности, отсутствуют.

Целью данной работы является исследование влияния различных составляющих распределения потенциала на характеристики квадрупольного фильтра масс при его работе в верхней и нижней вершинах четырехугольника стабильности (зоны 2-1) при импульсном питании.

Методика численного моделирования

Распределение потенциала в квадрупольном фильтре масс в самом общем случае можно представить в виде функции [13]:

$$u(x, y) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_{2n} u_n^{(a)}(x, y) + b_{2n} u_n^{(b)}(x, y) + c_{2n+1} u_n^{(c)}(x, y) + d_{2n+1} u_n^{(d)}(x, y)],$$

где a_0 – постоянная составляющая; a_{2n} , b_{2n} , c_{2n+1} , d_{2n+1} – весовые коэффициенты составляющих при $n \geq 1$,

$$u_n^{(a)} = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n)!}{(2n-2k)!(2k)!} x^{2n-2k} y^{2k},$$

$$u_n^{(b)} = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(-1)^k (2n-1)!}{(2n-(2k+1))!(2k+1)!} x^{2n-(2k+1)} y^{2k+1},$$

$$u_n^{(c)} = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2k} y^{2n+1-2k},$$

$$u_n^{(d)} = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k (2n+1)!}{(2n+1-2k)!(2k)!} x^{2n+1-2k} y^{2k}.$$

Для идеального квадратичного распределения потенциала, когда оси координат системы проходят через середины полеобразующих электродов квадрупольного фильтра масс, единственными ненулевыми являются члены a_{2n} второго порядка, для которых $n = 1$, а весовые коэффициенты b_{2n} , c_{2n+1} , d_{2n+1} равны нулю.

Численное моделирование процессов сортировки заряженных частиц в квадрупольном фильтре масс основано на решениях соответствующих дифференциальных уравнений движения, которые при наличии квадратичного распределения потенциала и использовании импульсного питания электродной системы, форма которого приведена на рисунке 1, имеют вид

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = a_n^2 x \\ \frac{d^2y}{dt^2} = -a_n^2 y \end{cases} \text{ при } 0 \leq t < t_1,$$

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = -q_n^2 x \\ \frac{d^2y}{dt^2} = q_n^2 y \end{cases} \text{ при } t_1 \leq t < T.$$

В условиях наличия отклонения в распределении потенциала от квадратичного уравнения становятся связанными и не имеют аналитического решения. Поэтому для решения этих дифференциальных уравнений движения заряженных частиц используется численный метод Рунге – Кутты – Мерсона (пятиэтапный метод Рунге – Кутты 4-го порядка), который позволяет достичь высокой точности расчета в условиях быстро изменяющихся функций, что важно при использовании импульсного высокочастотного питания электродной системы.

Результаты численного моделирования

Моделирование работы квадрупольного фильтра масс в верхней (M) и нижней (S) вершинах четырехугольника стабильности сначала было проведено при отсутствии нелинейных искажений электрического поля. В ходе исследования были проведены расчеты массовых пиков при следующих параметрах квадрупольного фильтра масс:

- время сортировки, периодов ВЧ напряжения 55;
- радиус входной диафрагмы, отн. ед. 0,1;
- режим ввода ионов непрерывный.

Расчитанные массовые пики при различной разрешающей способности приведены на рисунке 3.

Расчеты показали, что при прочих равных условиях [разрешающая способность, определенная по уровню полувысоты пика ($R_{0,s}$), время сортировки и пр.] интенсивность массовых пиков при работе в нижней (S) вершине (рисунок 3, *a*) острова стабильности больше, чем в верхней (M) вершине (рисунок 3, *б*), что соответствует расчетам аксептанса, приведенным в работе [14], для гармонического питания. При импульсном питании преимущество нижней (S) вершины только увеличивается с ростом разрешающей способности. Так, отношение интенсивностей пиков в нижней (S) и верхней (M) вершинах при разрешающей способности 250 составляет 1,2, а при разрешающей способности 1000 достигает 1,8.

При этом стоит отметить, что в верхней (M) вершине форма массового пика имеет более круглые фронты по сравнению с пиком в нижней (S) вершине. Коэффициент формы, определяемый соотношением:

$$K_f = \frac{\Delta_{0,5}}{\Delta_{0,1}},$$

где $\Delta_{0,5}$, $\Delta_{0,1}$ – ширина массового пика, определенная на уровнях 0,5 и 0,1 от максимальной интенсивности, имеет соответственно значения 1,13 для разрешающей способности 250 и значения 1,29 для разрешающей способности 1000. Это позволяет сделать вывод о необходимости использования верхней (M) вершины при импульсном питании для изотопного анализа.

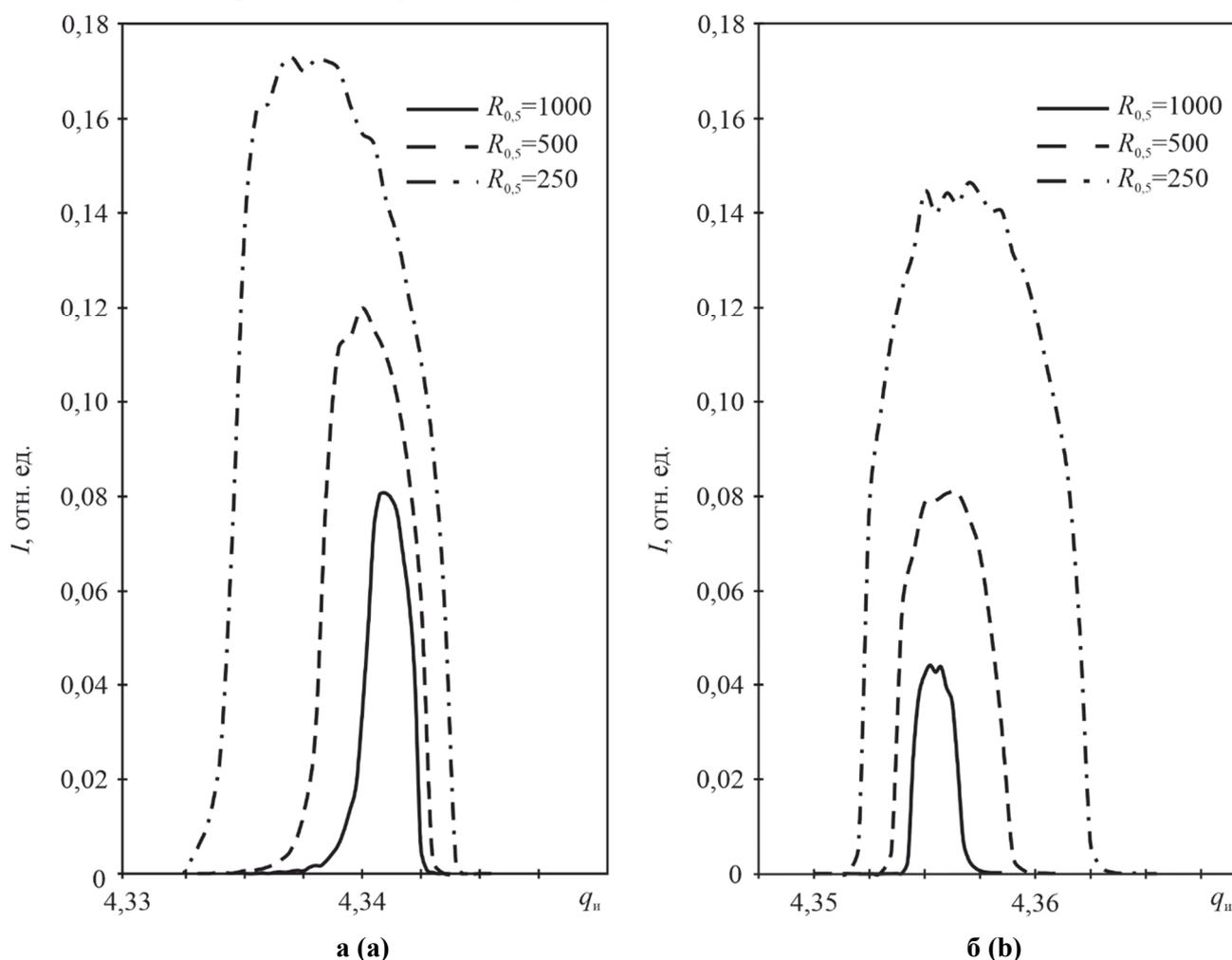


Рисунок 3 – Массовые пики при различных разрешающих способностях по уровню 0,5 от высоты
Figure 3 – Mass peaks at various resolutions at the level of 0,5 of height

Дальнейшие исследования были посвящены изучению влияния нелинейных искажений электрического поля. Проведенные ранее исследования [15, 16] показали, что составляющие высших порядков, описываемые коэффициентами a_{2n} ($n = 2, 3, \dots$), обусловлены симметричными относительно осей координат искажениями электродной системы квадрупольного фильтра масс, а все остальные составляющие b_{2n} , c_{2n+1} , d_{2n+1} ($n = 1, 2, \dots$) связаны с наличием несимметричных искажений масс-анализатора. При этом наличие составляющих b_{2n} , c_{2n+1} , d_{2n+1} приводит к ухудшению в той или иной степени аналитических характеристик квадрупольного масс-анализатора. Это подтверждается анализом работы фильтра масс как в верхней (M), так и в нижней (S) вершинах четырехугольника стабильности. Поэтому практический интерес имеет анализ влияния симметричных искажений, описываемых составляющими с коэффициентами a_{2n} .

Для изучения влияния симметричных искажений распределения потенциала были проведены расчеты массовых пиков при одной и той же разрешающей способности, равной 300,

при отсутствии нелинейных искажений, как в верхней (M), так и в нижней (S) вершинах четырехугольника стабильности при различных значениях коэффициентов a_{2n} .

Было проведено исследование влияния составляющих высших порядков на величину разрешающей способности квадрупольного фильтра масс. Соответствующие зависимости для составляющих, описываемых коэффициентами a_4 , a_6 и a_8 , приведены на рисунке 4.

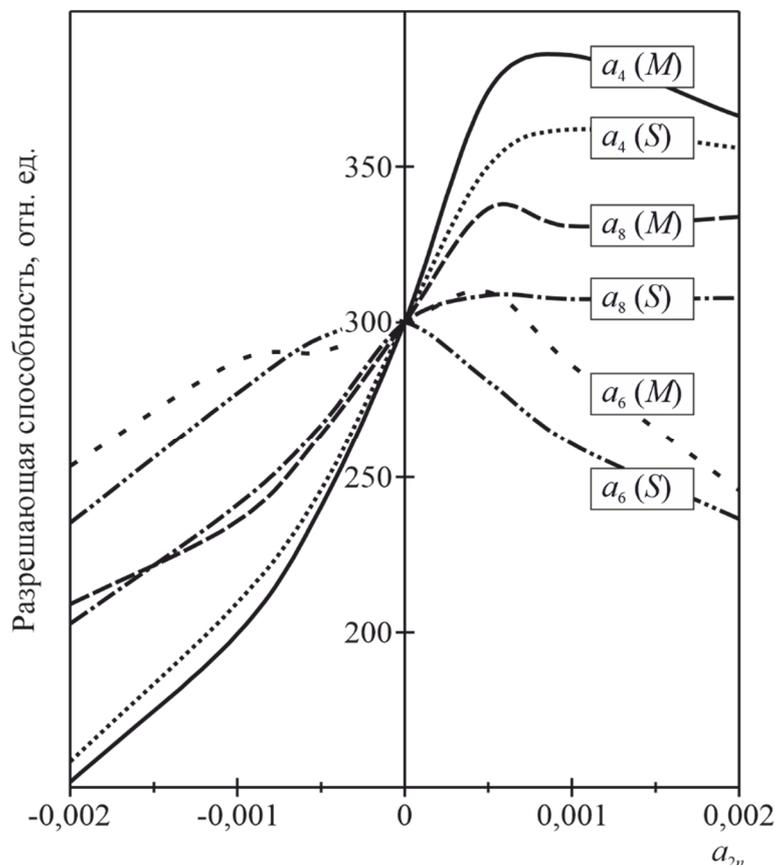


Рисунок 4 – Зависимость разрешающей способности от величин коэффициентов a_4 , a_6 и a_8
Figure 4 – Dependence of resolution on the values of coefficients a_4 , a_6 and a_8

Как показали расчеты, характер влияния соответствующих отклонений от квадратичного распределения потенциала одинаков как в верхней (M), так и в нижней (S) вершинах. Так, появление составляющих распределения потенциала с отрицательными значениями коэффициента a_{2n} приводит к уменьшению разрешающей способности, причем наиболее значительное влияние оказывают составляющие с отрицательными коэффициентами a_4 , a_8 и т. д. Наличие в распределении потенциала составляющих с положительными коэффициентами a_4 и a_8 приводит к увеличению разрешающей способности, при этом наибольшее увеличение разрешающей способности как в верхней, так и в нижней вершинах связано с наличием октупольных составляющих, описываемых коэффициентами a_4 . А составляющие с коэффициентами a_6 , a_{10} и т. д. уменьшают разрешающую способность и при работе в верхней (M) вершине, и при работе в нижней (S) вершине четырехугольника стабильности.

Полученный эффект улучшения разрешающей способности в некотором роде нивелируется уменьшением интенсивности массовых пиков. Для анализа такого влияния было проведено исследование зависимости добротности, т. е. произведения разрешающей способности и интенсивности массовых пиков. На рисунках 5 и 6 приведены соответствующие зависимости для составляющих распределения потенциала, описываемых коэффициентами a_4 и a_6 соответственно.

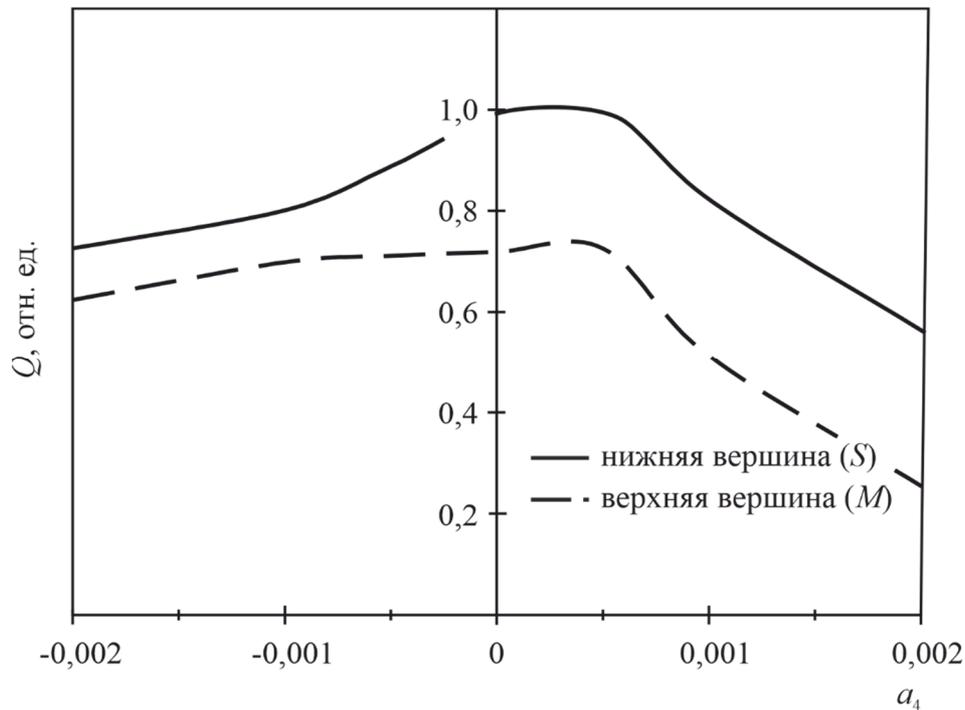


Рисунок 5 – Зависимость добротности Q массового пика от величины коэффициента a_4
 Figure 5 – Dependence of Q -factor of mass peak on the value of coefficient a_4

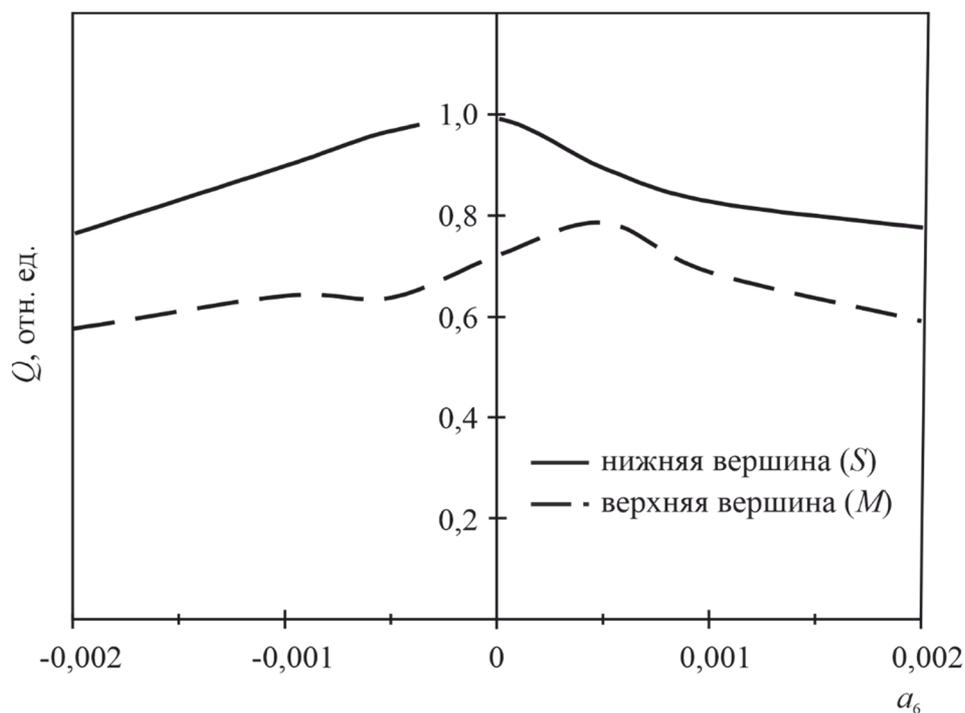


Рисунок 6 – Зависимость добротности Q массового пика от величины коэффициента a_6
 Figure 6 – Dependence of Q -factor of mass peak on the value of coefficient a_6

Если сравнить зависимости добротности, т. е. произведения разрешающей способности и интенсивности массового пика, от величин коэффициентов a_4 и a_6 (см. рисунки 5 и 6), то очевидно преимущество нижней вершины второй зоны стабильности над верхней вершиной. Из зависимостей, показанных на рисунках 5 и 6, видно, что как в случае идеального квадратичного распределения потенциала, так и при наличии искажений электрического поля, при прочих равных условиях добротность при работе в нижней (S) вершине четырехугольника стабильности выше, чем в верхней (M) вершине. Однако только для небольших искажений, вносимых октапольными составляющими, описываемыми положительными коэффициента-

ми a_4 , наблюдается сохранение добротности на уровне идеального квадратичного распределения потенциала. При этом величина коэффициента a_4 не должна превышать значения 0,0005. Аналогичные результаты наблюдаются и при других значениях симметричных искажений, описываемых коэффициентами a_{2n} более высоких порядков.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. Достижение высоких значений разрешающей способности как при гармоническом, так и при импульсном питании в квадрупольном фильтре масс связано с переходом в работе в верхние зоны общей диаграммы стабильности. Работа возможна как в верхней (M), так и в нижней (S) вершине четырехугольника стабильности. Как при гармоническом, так и при импульсном питании нижняя вершина оказывается более предпочтительна, так как при прочих равных условиях интенсивность массовых пиков оказывается выше.

При импульсном питании с ростом разрешающей способности при прочих равных параметрах интенсивность массовых пиков в вершине (S) выше, чем в вершине (M), и с ростом разрешающей способности этот эффект только усиливается, что, в свою очередь, увеличивает добротность квадрупольного масс-анализатора.

Введение в распределение потенциала в анализаторе квадрупольного фильтра масс составляющих высших порядков, связанных с симметричными искажениями электродной системы и описываемых коэффициентами a_4 , a_8 и т. д., позволяет увеличить разрешающую способность при работе как в верхней (M), так и в нижней (S) вершинах четырехугольника стабильности.

Библиографический список

1. Paul W. A new mass spectrometer without a magnetic field / W. Paul, H. Steinwedel // Z. Naturforsch. 1953, 8a, p. 448-450.
2. Шеретов Э.П., Терентьев В.И. Основы теории квадрупольных масс-спектрометров при импульсном питании // ЖТФ. 1972. Т. 42, В. 5. С. 953-962.
3. Paul W. Das elektrische Massenfilter / W. Paul, M. Raether // Z. für Physik. 1955, no. 140, p. 262-273.
4. Sheretov E.P., Kolotilin B.I., Veselkin N.V., Brykov A.V., Fedosov E.V. Opportunities for optimization of the RF signal applied to electrodes of quadrupole mass spectrometers. Part II. EC signals. Int J Mass Spectrom. 2000, 198, p. 97-111.
5. Douglas D.J., Kononkov N.V. Ion source emittance influence on the transmission of a quadrupole operated in the second stability region // J. Am. Soc. Mass Spectrom. 1998. 9, N 10 P. 1074-1080.
6. Syed S.U.A.H., Hogan T., Gibson J., Taylor S. Factors Influencing the QMF Resolution for Operation in Stability Zones 1 and 3. J. Am. Soc. Mass Spectrom. 2012. 23(5), P. 988-995.
7. Z. Du et al. Peak structure with a quadrupole mass filter operated in the third stability region // International Journal of Mass Spectrometry 197 (2000) 113-121.
8. Douglas D.J. Linear Quadrupoles in Mass Spectrometry // Department of Chemistry, University of British Columbia 2036 Main Mall, Vancouver, B.C., V6T 1Z1, Canada.
9. Дубков М.В., Буробин М.А. Исследование распределения потенциала в монопольном масс-анализаторе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 33. С. 72-76.
10. Zhao X.-Z., Xiao Z., Douglas D.J. Overcoming Field Imperfections of Quadrupole Mass Filters with Mass Analysis in Islands of Stability // Anal. Chem. 2009. Vol. 81. P. 5806-5811.
11. Ding Ch. Quadrupole mass filters with octopole fields / Ch Ding, N.V. Kononkov, D.J. Douglas // Rapid Commun. In Mass Spectrom. 2003, vol. 17 (22), pp. 2495-2502.
12. Бугров П.В., Сысоев А.А., Коненков Н.В. Моделирование квадрупольного фильтра масс с октупольным полем // Масс-спектрометрия. 2022. Т. 19. № 3. С. 197-200.
13. Дубков М.В., Буробин М.А. Исследование влияния составляющих высших порядков распределения потенциала на характеристики квадрупольного фильтра масс при работе во второй зоне стабильности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 81. С. 72-80.

14. **Коненков Н.В.** Влияние краевого поля на аксептанс квадрупольного фильтра масс в режиме работы нижней вершины прямоугольника стабильности // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 10. С. 121-125.

15. **Дубков М.В., Николаев А.В.** Влияние нелинейных искажений электрического поля на эллипсы захвата заряженных частиц в пролетных квадрупольных масс-спектрометрах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2007. № 21. С. 97-100.

16. **Дубков М. В., Колотилин Б.И., Николаев А.В.** Исследование влияния нелинейных искажений электрического поля в анализаторе квадрупольного фильтра масс на условия сортировки заряженных частиц // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 36. С. 67-70.

UDC 543.084.085: 541.12.084.08

STUDYING THE OPERATING FEATURES OF QUADRUPOL MASS FILTER IN UPPER AND LOWER VERTS OF STABILITY QUADRANGLE IN THE PRESENCE OF ELECTRIC FIELD NONLINEARITY

M. V. Dubkov, Dr. in technical sciences, full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0002-5791-0991, e-mail: dubkov.m.v@rsreu.ru

M. A. Burobin, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-4465-6362, e-mail: burobin.mikhail@yandex.ru

V. V. Ivanov, Ph.D. (in technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0002-5655-0111, e-mail: vladimir.nvi@gmail.com

K. A. Vetshev, graduate student, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0000-7789-7520, e-mail: pro100kirik01@gmail.com

A. D. Rubtsova, graduate student, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0009-0004-0215-908x, e-mail: adr1999@list.ru

The features of quadrupole mass filter operation in upper and lower vertices of stability quadrangle are studied under pulsed power supply and in the presence of higher-order components in potential distribution.

The aim of this work is to compare the influence of various higher-order components on the analytical characteristics of a quadrupole mass filter when operating at upper and lower vertices of stability quadrangle using pulsed power. Using numerical modeling methods, a comparison was made of the operating features of the quadrupole mass filter both in the absence and in the presence of higher-order components in the potential distribution. The research shows that with increasing resolution, the ratio of the intensities of mass peaks increases when working at lower and upper vertices, respectively. Also, if there are certain higher-order components in potential distribution associated with symmetrical distortions of electrode system, the resolution of mass filter increases, both at upper and lower vertices of stability quadrangle.

Keywords: quadrupole mass filter, stability quadrangle, higher order components, mass peak, resolution, mass peak intensity.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-162-171

References

1. **Paul W.** A new mass spectrometer without a magnetic field / W. Paul, H. Steinwedel. *Z. Naturforsch.* 1953, 8a, p. 448-450.

2. **Sheretov E.P., Terent'ev V.I.** Osnovy teorii kvadrupol'nyh mass-spektrometrov pri impul'snom pitanii. *ZhTF.* 1972, no. 42, vol. 5, pp. 953-962. (in Russian).

3. **Paul W.** Das elektrische Massenfilter / W. Paul, M. Raether. *Z. für Physik.* 1955, no. 140, pp. 262-273.

4. **Sheretov E.P., Kolotilin B.I., Veselkin N.V., Brykov A.V., Fedosov E.V.** Opportunities for optimization of the RF signal applied to electrodes of quadrupole mass spectrometers. Part II. EC signals. *Int J Mass Spectrom.* 2000, 198, pp. 97-111.

5. **Douglas D.J., Konenkov N.V.** Ion source emittance influence on the transmission of a quadrupole operated in the second stability region. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 1998, 9, no. 10, pp. 1074-1080.
6. **Syed S.U.A.H., Hogan T., Gibson J., Taylor S.** Factors Influencing the QMF Resolution for Operation in Stability Zones 1 and 3. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* 2012. 23(5), pp. 988-995.
7. **Z. Du et al.** Peak structure with a quadrupole mass filter operated in the third stability region. *International Journal of Mass Spectrometry.* 197 (2000), 113-121.
8. **Douglas D.J.** Linear Quadrupoles in Mass Spectrometry. *Department of Chemistry, University of British Columbia* 2036 Main Mall, Vancouver, B.C., V6T 1Z1, Canada.
9. **Dubkov M.V., Burobin M.A.** Issledovanie raspredelenija potentsiala v monopol'nom mass-analizatore. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2010, no. 33, pp. 72-76. (in Russian).
10. **Zhao X.-Z., Xiao Z., Douglas D.J.** Overcoming Field Imperfections of Quadrupole Mass Filters with Mass Analysis in Islands of Stability. *Anal. Chem.* 2009, vol. 81, pp. 5806-5811.
11. **Ding Ch.** Quadrupole mass filters with octopole fields / Ch Ding, N.V. Konenkov, D.J. Douglas. *Rapid Commun. In Mass Spectrom.* 2003, vol. 17 (22), pp. 2495-2502.
12. **Bugrov P.V., Sysoev A.A., Konenkov N.V.** Modelirovanie kvadrupol'nogo fil'tra mass s oktu-pol'nym polem. *Mass-spektrometrija.* 2022, vol. 19, no. 3, pp. 197-200. (in Russian).
13. **Dubkov M. V., Burobin M.A.** Issledovanie vlijanija sostavljajushhikh vysshih porjadkov raspredelenija potentsiala na karakteristiki kvadrupol'nogo fil'tra mass pri rabote vo vtoroj zone stabil'nosti. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2022, no. 81, pp. 72-80. (in Russian).
14. **Konenkov N.V.** Vlijanie kraevogo polja na akseptans kvadrupol'nogo fil'tra mass v rezhime raboty nizhnjej vershiny prjamougol'nika stabil'nosti. *ZhTF.* 1997, vol. 67, no. 10, pp. 121-125. (in Russian).
15. **Dubkov M.V., Nikolaev A.V.** Vlijanie nelinejnyh iskazhenij jelektricheskogo polja na jellipsy zahvata zarjazhennyh chastic v proletnyh kvadrupol'nyh mass-spektrometrah. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2007, no. 21, pp. 97-100. (in Russian).
16. **Dubkov M.V., Kolotilin B.I., Nikolaev A.V.** Issledovanie vlijanija nelinejnyh iskazhenij jelektricheskogo polja v analizatore kvadrupol'nogo fil'tra mass na uslovija sortirovki zarjazhennyh chastic. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2011, no. 36, pp. 67-70. (in Russian).