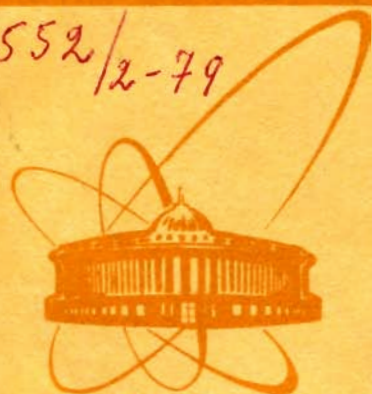


5552/2-79



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

29/12-79

И-811

P11 - 12661

А.Ш.Иркегулов, А.Б.Швачка

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ  
ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ  
ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ

1979

P11 - 12661

А.Ш.Иркегулов. А.Б.Швачка

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ  
ПОЛУБЕСКОНЕЧНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ  
ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ

Направлено на VI Всесоюзный семинар по комплексам программ математической физики /Днепропетровск, 1979/

Иркегулов А.Ш., Швачка А.Б.

P11 - 12661

Пакет программ для расчета электромагнитного возбуждения полубесконечных коаксиальных волноводов движущимся источником

Описан пакет программ, предназначенный для расчета электромагнитного возбуждения коаксиальных систем с двумя разрывами движущимся и неподвижным источниками. Пакет позволяет произвести расчет полей, возбуждаемых источником в сложной волноводной системе, а также вычислить плотность и поток энергии излучения и радиационную силу, действующую на сгусток.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Irkegulov A.Sh., Shvachka A.B.

P11 - 12661

Software Package for Computation  
of Electromagnetic Excitation of Semiinfinite  
Waveguide System by a Moving Source

The description of software package for computation of electromagnetic excitation of the semiinfinite coaxial system with two discontinuities by rest or moving source is given. The package may be used for computation of electromagnetic fields excited by source in the complicated waveguide system, energy flux density and the radiative force acting on the bunch.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

В работе приведено описание пакета программ, предназначенного для расчета электромагнитного возбуждения коаксиальной волноводной системы с двумя разрывами границ как покоящимся <sup>1/</sup>, так и движущимся вдоль оси волноводной системы <sup>2,3/</sup> кольцевым сгустком с током. Отдельные программы пакета служат для вычисления полей, возбуждаемых кольцевым сгустком с током, плотности и потока энергии в различных областях волноводной системы, а также величины радиационной силы, действующей на кольцевой сгусток.

## 1. СТРУКТУРА ПАКЕТА ПРОГРАММ

Программа SYSTEM является главной управляющей программой пакета. Последовательно вызывая программы GUIDE и REMOVE, она организует процесс вычисления значений цилиндрических функций и их комбинаций, входящих в выражения для полей излучения <sup>1-8/</sup>, а также динамических характеристик системы сгусток-волновод в зависимости от величины скорости движения источника вдоль оси волноводной системы. Упрощенная блок-схема пакета программ приведена на рис. 1.

В начале работы пакета с помощью оператора NAMELIST в блок COMMON вводятся значения параметров волноводной системы и сгустка. Путем замены набора исходных параметров системы можно перейти к расчету возбуждения другой волноводной системы.

Программа SYSTEM вычисляет массив значений  $t_i$ , соответствующих временам пролета источником трех различных областей волноводной системы /слева от разрыва волноводов, между разрывами и справа от разрыва волноводов/ при различных значениях релятивистского фактора  $\gamma (1 \leq \gamma \leq 10^4)$ . После вычисления значений  $t_i$  управление передается последовательно программам GUIDE и REMOVE.

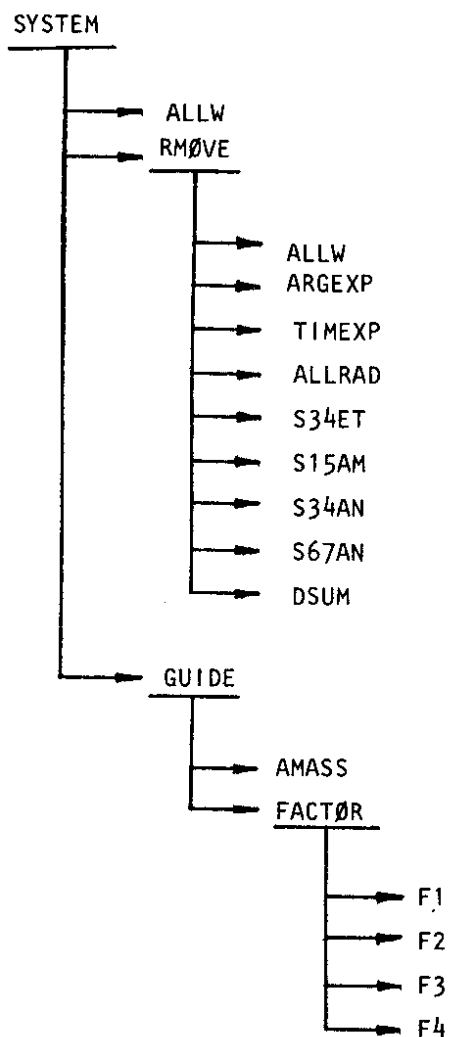


Рис. 1. Упрощенная блок-схема пакета программ.

## 2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ GUIDE

Программа GUIDE, вызывая последовательно подпрограммы AMASS и FACTOR, организует процесс вычисления значений цилиндрических функций, а также функций, факторизованных по методу Винера-Хопфа-Фока /ВХФ/ <sup>1/4</sup>.

Подпрограмма AMASS служит для вычисления значений функций Бесселя и Ханкеля первого порядка, а также их комбинаций, аргументами которых служат величины  $v_\ell = \frac{\mu_{1\ell}}{d_j}$ ,

где  $\mu_{1\ell}$  —  $\ell$ -ый корень цилиндрической функции первого порядка,  $d_j$  — радиусы волноводных труб ( $j=1,2$ ). Для вычисления цилиндрических функций при фиксированном значении аргумента используется стандартная программа BESJY из ОБСП БЭСМ-6.

Программа FACTOR служит для вычисления значений факторизованных по методу ВХФ цилиндрических функций для заданного набора значений их аргументов.

В выражения для полей, возбуждаемых источником, входят факторизованные цилиндрические функции четырех типов, аналитические выражения которых имеют вид:

$$F_1 = f_{\pm}(w_\ell) = \sqrt{F_1(0)} \prod_{n_1=1}^{N_1} \left(1 \mp \frac{w_\ell}{w_{n_1}}\right) \prod_{n_1 > N_1} \left(1 + \frac{w_\ell^2}{v_{n_1}^2 - k^2}\right)^{1/2} \exp\left\{\pm \frac{\pi w_\ell}{2A}\right\} \times \\ \times \exp\left\{i\left[\frac{\pi v_\ell}{2A} \mp \frac{v_\ell}{A} \arctg \frac{w_\ell}{v_\ell} \pm \frac{w_\ell}{A} \left(1 - C + \ln \frac{2A}{k}\right) \mp \right. \right. \quad // /$$

$$\left. \mp \frac{w_\ell}{k} \sum_{n_1=1}^{N_1} \frac{1}{n_1} \pm \sum_{n_1 > N_1} \left(\arctg \frac{w_\ell}{\sqrt{v_{n_1}^2 - k^2}} - \frac{w_\ell}{n_1 A}\right)\right\},$$

$$F_2 = f_{\pm}(iw_\ell^*) = \sqrt{F_2(0)} \exp\left\{i \frac{v_\ell}{A} \ln \left(\frac{\pm w_\ell^* - v_\ell}{k}\right) \pm \frac{w_\ell^*}{A} \left[1 - C + \ln \frac{2A}{k}\right] \pm \right. \quad // / \\ \left. \pm \sum_{n_1=1}^{N_1} \frac{w_\ell^*}{n_1 A} \cdot \prod_{n_1=1}^{N_1} \left[1 + \left(\frac{w_\ell^*}{w_{n_1}}\right)^2\right]^{1/2} \prod_{n_1 > N_1} \left(1 \mp \frac{w_\ell^*}{v_{n_1}^2 - k^2}\right)\right\} \times$$

$$\times \exp\left\{i\left[\frac{\pi v_\ell^*}{2A} \pm \frac{\pi w_\ell^*}{2A} \mp \sum_{n_1=1}^{N_1} \arctg \frac{w_\ell^*}{w_{n_1}}\right]\right\} \exp\left\{\pm \sum_{n_1 > N_1} \frac{w_\ell^*}{n_1 A}\right\},$$

$$F_3 = f_{\pm}(w_\ell) = \sqrt{F_3(w_\ell)} \cdot \exp\left\{\pm \frac{v_\ell}{A} \arctg \frac{w_\ell}{v_\ell} \pm \frac{\pi w_\ell}{2A}\right\} \times$$

$$\times \exp\left\{i \sum_{n_1 > N_1} \left[\arctg \frac{w_\ell}{\sqrt{v_{n_1}^2 - k^2}} - \frac{w_\ell}{n_1 A}\right] - \frac{w_\ell}{A} \left[1 - C + \ln \frac{2A}{k}\right] - \right.$$

$$- \frac{w_{\ell}}{A} \sum_{n_1=1}^{N_1} \frac{1}{n_1} \} \times \prod_{n_1=1}^{N_1} \frac{(1 \mp w_{\ell}/w_{n_1})^{1/2}}{(1 \pm w_{\ell}/w_{n_1})^{1/2}}, \quad /3/$$

$$F_4 = f_{\pm}(i w_{\ell}^*) = \sqrt{F_4(i w_{\ell}^*)} \exp \left\{ \mp \frac{w_{\ell}^*}{A} [1 - C + \ln \frac{2A}{k}] \right\} \times$$

$$\times \exp \left\{ \pm \frac{w_{\ell}^*}{A} \sum_{n_1=1}^{N_1} \frac{1}{n_1} \right\} \exp \left\{ \mp \sum_{n_1 > N_1}^{\infty} \operatorname{arctg} \frac{w_{\ell}^*}{\sqrt{w_{n_1}^2 - k^2}} - \frac{w_{\ell}^*}{n_1 A} \right\} \times \quad /4/$$

$$\times \exp \left\{ i \left[ \pm \frac{v_{\ell}^*}{A} \operatorname{arctg} \frac{w_{\ell}^*}{v_{\ell}^*} \pm \frac{\pi v_{\ell}^*}{2A} \mp \sum_{n_1=1}^{N_1} \operatorname{arctg} \frac{w_{\ell}^*}{w_{n_1}} \right] \right\}.$$

Здесь  $w_{\ell}^* = \sqrt{v_{\ell}^{*2} - k^2}$  - продольный волновой вектор  $\ell$ -ой волны,  $C$  - постоянная Эйлера. При  $i \rightarrow \infty$   $v_{\ell} = iA$ , где  $A = \frac{\pi}{2}$  при условии  $J_1(v_{\ell} a) = 0$  и  $A = \pi/(b-a)$  в случае, когда  $v_{\ell}$  является корнем уравнения

$$J_1(v_{\ell} a) H_1^{(1)}(v_{\ell} b) - J_1(v_{\ell} b) H_1^{(1)}(v_{\ell} a) = 0. \quad /5/$$

Для вычисления выражений /1-4/ подпрограмма FACTOR вызывает последовательно подпрограммы-функции F1, F2, F3 и F4.

Подпрограммы-функции F1 и F3 предназначены для вычисления значений факторизованных цилиндрических функций в случае, когда  $w_{\ell} < k$  /  $k = \omega/c = 11 \text{ см}^{-1}$ /. При  $|w_{\ell}| > k$  используются подпрограммы-функции F2 и F4. Контроль точности вычисленных значений цилиндрических функций осуществляется с помощью рекуррентных соотношений, которым удовлетворяют соответствующие цилиндрические функции, а в случае факторизованных функций - с помощью соответствующих аналитических выражений для факторизованных функций. Выбранный способ вычисления значений цилиндрических функций обеспечивает 10-11 верных значащих цифр.

После накопления значений цилиндрических и факторизованных по методу ВХФ функций для заданного набора их корней работа программы GUIDE завершается, и управление передается программе RMOVE.

### 3. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ RMOVE

Программа RMOVE вычисляет динамические характеристики системы сгусток-волновод, а именно, плотность и поток энергии в различных областях волноводной системы, а также радиационную силу, действующую на сгусток, в зависимости от величины скорости движения сгустка вдоль оси системы. Для вычисления указанных выше динамических характеристик системы программа RMOVE последовательно вызывает подпрограммы ALLW, ARGEXP, TIMEXP, ALLRAD, ряд подпрограмм, служащих для вычисления величин, входящих в выражения для полей / S34AN, S15AM, S67AN, S34ET /, а также подпрограмму DSUM.

Подпрограмма ALLW вычисляет значения продольных волновых векторов  $w_{\ell} = (k^2 - v_{\ell}^2)^{1/2} = (k^2 - \mu_{j\ell}^2 / d_j^2)^{1/2}$  при заданных значениях радиусов труб для фиксированного набора корней цилиндрических функций  $J_1(\mu_{j\ell}) = 0$ .

Подпрограммы ARGEXP и TIMEXP вычисляют экспоненциальные множители, входящие в выражения для полей, возбуждаемых сгустком. Подпрограмма ARGEXP вычисляет экспоненциальные множители, стоящие под знаком суммы, где суммирование ведется по продольным волновым векторам волн, излучаемых разрывом. Подпрограмма TIMEXP вычисляет значения экспоненциальных множителей, соответствующих волнам, излучаемым источником. Обе указанные подпрограммы вызываются последовательно для вычисления экспоненциальных множителей, соответствующих различным областям волноводной системы с двумя разрывами границ. Для перехода к расчету возбуждения другой коаксиальной системы необходимо внести изменения в подпрограммы ARGEXP и TIMEXP.

Подпрограмма ALLRAD служит для вычисления корней комбинации цилиндрических функций первого рода

$$z(v) = J_1(vd_1)H_1^{(1)}(vd_2) - J_1(vd_2)H_1^{(1)}(vd_1), \quad /6/$$

где  $v$  - поперечный волновой вектор волны, распространяющейся в волноводе. При фиксированной частоте тока источника в волноводной системе может распространяться конечное число незатухающих волн, все остальные волны экспоненциально затухают. После определения области изменения функции  $z(v)$  вызывается стандартная программа RZERO для вычисления нулей функции  $z(v)$ . Как показало сравнение, нули  $z(v)$ , найденные с помощью RZERO, достаточно хорошо совпадают с табличными значениями /5/ /пять верных значащих цифр/.



Подпрограммы S34AN, S15AM, S67AN и S34ET служат для вычисления выражений, стоящих под знаком суммы в формулах для полей, возбуждаемых источником в трех пространственных областях волноводной системы.

Подпрограмма DSUM вычисляет произведения величин, стоящих под знаком суммы по волновым векторам падающих и рассеянных волн и производит их суммирование.

После этого управление передается программе RMOVE, которая вычисляет плотность и поток энергии излучения, а также радиационную силу, действующую на кольцевой сгусток при его движении вдоль оси волноводной системы.

Для расчета дифракции электромагнитных волн на открытом конце волноводной системы <sup>/2/</sup> в программу GUIDE были включены дополнительные программные блоки. При этом программа вычисляет плотность и поток энергии излучения от неподвижного монохроматического источника, локализованного последовательно в трех областях волноводной системы. Поля, возбуждаемые источником, вычисляются в волновой зоне. Для вычисления интегралов в смысле главного значения, входящих в аналитические выражения для полей, использована программа CAUCHY из ОБСП БЭСМ-6.

С помощью описанного выше пакета программ произведен также расчет переходного излучения, возникающего при пролете постоянных зарядов и токов мимо разрывов волноводной системы. В этой задаче подпрограммы S34AN, S15AM, S67AN и S34ET использованы для вычисления выражений под знаком суммы, где суммирование ведется по волновым векторам затухающих волн. Подпрограммы-функции F2 и F4 служат для вычисления факторизованных функций с учетом затухающих гармоник.

Проделав предельный переход  $a_2 \rightarrow \infty$  в выражениях для полей,

$$\lim_{a_2 \rightarrow \infty} \frac{(d_{\ell, a_2})_{\pm}}{(d_{k, a_2})_{\pm}} = \frac{(d_{\ell, \infty})_{\pm}}{(d_{k, \infty})_{\pm}}, \quad \ell, k = 1, 2, \quad \ell \neq k, \quad //$$

получим формулы для вычисления полей излучения в свободном пространстве.

Правильность вычисления динамических характеристик системы сгусток-волновод контролировалась с помощью закона сохранения энергии для электромагнитного поля. Относительная погрешность расчетов не превышает 0,1%.

Результаты расчетов выводятся на печать в виде таблиц и графиков.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный выше пакет программ благодаря модульной структуре может быть использован для расчета динамических характеристик поля излучения, возбуждаемого как покоящимся, так и движущимся источником переменного поля в волноводных системах с двумя разрывами границ. Параметры системы сгусток-волновод могут быть изменены пользователем в интерактивном режиме.

Пакет программ реализован на ЭВМ CDC-6500 и БЭСМ-6 на языке ФОРТРАН.

Авторы выражают глубокую благодарность Э.И.Уразакову за стимулирующие дискуссии и постоянный интерес к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иркегулов А.Ш., Уразаков Э.И., Швачка А.Б. ОИЯИ, Р9-11897, Дубна, 1978.
2. Иркегулов А.Ш., Уразаков Э.И., Швачка А.Б. ОИЯИ, Р9-12613, Дубна, 1979.
3. Иркегулов А.Ш., Уразаков Э.И., Швачка А.Б. ОИЯИ, Р9-12614, Дубна, 1979.
4. Вайнштейн Л.А. Теория дифракции и метод факторизации. "Советское радио", М., 1966. Игушкин Л.П., Уразаков Э.И. Препринт НИИЯФ МГУ, ч.1-3., М., 1969.
5. Янке Е., Эмде Ф. Таблицы функций с формулами и кривыми. Пер. с нем. Гостехиздат, М.-Л., 1948.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 июля 1979 года.