

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ СИММЕТРИЧНОГО ДВОЙНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА (СДЗЛ)

**Нокедь В. П.<sup>1</sup>, Николаенко В. М.<sup>1</sup>, Ямпольский Ю. С.<sup>1</sup>, Мамедов К. Я.<sup>1</sup>, Венедиктов**

**Ю. И.<sup>1</sup>, Шувалов В. А.<sup>4</sup> Довгаль С. Г.<sup>2</sup>, Гдалевич Г. Л.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Одесский Национальный политехнический университет (ОНПУ), Одесса

<sup>2</sup>СПКБ «Дискрет» ОНПУ, Одесса

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>4</sup>Институт технической механики, Днепрпетровск

Развивая положения, изложенные в докладе «Исследование эффективности алгоритмов обработки характеристик симметричного двойного зонда Ленгмюра (СДЗЛ) на основе предложенного показателя качества» настоящего сборника, и учитывая, что предлагаемый метод измерения  $U_{\Sigma}$  и  $N$  должен производиться при небольшом анализирующем воздействии (с соблюдением условия  $U_{\Sigma} > U_A(t)$ ), преобразование сигналов будем производить для линейной развертки, поскольку при этом соответствующие выкладки упрощаются. В этом случае анализирующее воздействие записывается так:

$$U_A(t) = \begin{cases} at, & 0 < t \leq \tau_0, \\ 2at - at, & \tau_0 < t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $a$  — крутизна нарастания  $U_A$ ,  $T$  — период развертки,  $\tau_0 = T/2$ .

Предлагаемый метод основан на фиксации значения  $U_A(t)$ , связанного определенным соотношением с  $U_{\Sigma}$  при помощи специального строб-импульса в момент времени, когда значение  $U_A(t)$  с точностью до постоянного коэффициента станет равным  $U_{\Sigma}$ .

Исследование устройств проведем для СДЗЛ, отклик которого на анализирующее напряжение  $U_A(t)$  представляется в виде

$$i_d(t) = i_0 \operatorname{th} \frac{U_A(t)}{2U_{\Sigma}} \quad (2)$$

Продифференцируем анализирующее воздействие по :

$$Z_1(t) = \frac{dU_A}{dt} \quad (3)$$

Перемножив (2) с (3), получим

$$Z_2(t) = i_0 \operatorname{th} \frac{U_A(t)}{2U_{\Sigma}} \frac{dU_A}{dt} \quad (4)$$

Интегрируя последнее выражение, получим

$$Z_3 = i_0 \int_0^t \operatorname{th} \left[ \frac{U_A(\tau)}{2U_\Delta} \right] \frac{dU_A}{d\tau} d\tau = 2U_\Delta i_0 \ln \left( \operatorname{ch} \frac{U_A(t)}{2U_\Delta} \right). \quad (5)$$

Выражение (5) в качестве множителя содержит  $U_\Delta$ . Поэтому теперь необходимо получить второе выражение, которое содержит множителем  $i_0 U_A(t)$ . Поэтому, умножив (3.2) на  $U_A(t)$ , получим выражение

$$Z_4(t) = i_0 U_A(t) \operatorname{th} \frac{U_A(t)}{2U_\Delta}. \quad (6)$$

Суммируя (5) и (6), предварительно произведя инверсию знака первого из этих выражений, и введя коэффициент  $G = \int_0^T i(t) dt / [i(t) U_A(t)]$ , получим сигнал

$$Z_5(t) = i_0 U_A(t) \left[ \operatorname{th} \xi - G \frac{1}{\xi} \ln(\operatorname{ch} \xi) \right]. \quad (7)$$

Здесь  $\xi = U_A(t)/2U_\Delta$ .

Коэффициент  $G$  определяет заданное соотношение между  $U_\Delta$  и  $U_A$ , и воспроизводится эталонным источником. Каждому значению  $\xi$  соответствует определенное значение  $G$ . Выбор конкретного значения  $G$  зависит от соотношения  $S = dG/d\xi$ . Выбирается такое его значение, которому соответствует максимальное значение  $S$ . При этом, как нетрудно видеть, влияние нестабильности эталонного источника на погрешность измерения  $U_\Delta$  (а следовательно и  $N$ ) минимизируется.

Рассматриваемый метод основан на достижении текущего значения анализирующего напряжения некоторой величины, находящейся в определенном соотношении с  $U_\Delta$ . Так, например, если  $U_A = U_\Delta$  ( $\xi = 0.5$ ), то  $G = 1.924$ . Фиксация  $U_A = f(U_\Delta)$  производится генерацией специального строб-импульса, и в этот момент времени снимается значение  $U_A$ , равное  $U_\Delta$  с точностью до постоянного коэффициента.

Теперь нетрудно видеть, что этому условию соответствует значение  $Z_5(t) = 0$ , т. е. должно быть выполнено условие

$$\operatorname{th} \xi = G/\xi [\ln(\operatorname{ch} \xi)]. \quad (8)$$

Отсюда

$$G = \xi [\operatorname{th} \xi / (\ln(\operatorname{ch} \xi))]. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определять  $G$  при принятом  $\xi$  с учетом максимального значения  $S = dG/d\xi$ . Исследования показали, что при хорошем насыщении зондовой характеристики следует брать  $\xi = 0.9, \dots, 1.0$ . В противном случае  $\xi$  не должно быть выше 0.5 ( $U_A(t) = U_\Delta$ ).

Структурная схема измерительного устройства СУ, реализующая описанный алгоритм, изображена на рис. 1.

Анализирующее воздействие генератора подается на ДПП, аттенюаторы 1 и 3. Последний предназначен для ослабления величины воздействия до значения электронной температуры. Его коэффициент передачи определяется выбранным значением  $\xi$ . После ослабления в аттенюаторе 1 воздействие дифференцируется с инверсией и подается на первый вход умножителя 1, на второй вход которого подается отклик с выхода АП и ослабленный в аттенюаторе 2 (здесь коэффициенты передачи соответствующих блоков опущены). На выходе умножителя 1 действует сигнал (4), подаваемый на интегратор, а на выходе интегратора — сигнал (5), подаваемый на один из входов сумматора. Отклик ДПП через первый усилитель подается на первый вход умножителя 2, на второй вход которого подается воздействие с выхода второго усилителя. На выходе умножителя действует сигнал (6), являющийся входным сигналом на втором входе сумматора. После суммирования сигналов (5) и (6) появляется сигнал (7) на входе компаратора 1, состояние которого изменяется при выполнении условия (8). Из рис. 1 видно, что компараторы 1, 2, 3, схема «И» и дифференциатор 2 совместно вырабатывают стробирующий импульс. Тракт измерения концентрации обозначен укрупненным блоком N. Последний функционирует на основе использования известной температуры  $U_{\Sigma}$  (выражение 3). Дополнительным условием для определения концентрации заряженных частиц является формирование сигнала  $Z_0$ , представляющего некую константу, состоящую из первых трех членов прологарифмированного выражения (3) ( $\ln I_0 = \ln e^{3/2} + \ln M^{1/2} + \ln S + \ln U_{\Sigma}^{1/2} + \ln N$ ):  $Z_0 = \ln e^{3/2} + \ln M^{1/2} + \ln S$ . Этот сигнал в блоке N воспроизводится в виде эталонного электрического источника.

Поскольку концентрация заряженных частиц может изменяться в значительных пределах, на выходе измерительного устройства вырабатывается сигнал равный  $0.1 \ln N$ .

Результаты моделирования измерителя на ПК с использованием пакета программ NAP-2 показаны на рис. 2, где обозначено: 1 — анализирующее воздействие; 2 — строб-импульс; 3 — электронная температура; 4 — зондовая характеристика ДПП (ДЗЛ); 5 — концентрация плазмы N,

$$M = 0.1 \ln N.$$

Для проверки эффективности предложенного метода обработки ВАХ СДЗЛ на основе использования преобразования сигналов больших амплитуд рассмотрим одно из возможных преобразований, основанного на дифференцировании анализирующего воздействия по t:

$$Z_6(t) = \frac{i_0}{2U_{\Sigma}} \left[ \operatorname{ch}^{-2} \frac{UA(t)}{2U_{\Sigma}} \right] \frac{dUA(t)}{dt}. \quad (10)$$

Введя, как и в предыдущем случае, обозначения  $\xi$  и G, умножим выражение (10) на  $U_A$ , а отклик (6) — на  $dU_A/dt$ . В результате получим

$$Z_7(t) = i_0 \xi \left[ \operatorname{ch}^{-2} \xi \right] \frac{dU_A}{dt}, \quad (11)$$

$$Z_9(t) = i_0 \operatorname{th} \xi \frac{dU_A}{dt}. \quad (12)$$

Сравнивая выражения (11) и (12), можно видеть, что для получения однозначной зависимости  $U_A(t)$  и  $U_Э$ , необходимо произвести инверсию знака  $Z_7(t)$ , а затем произвести суммирование сигналов  $Z_7(t)$  и  $Z_8(t)$ , предварительно помножив один из них на коэффициент  $G$ . Результат указанных преобразований даст сигнал

$$Z_{11}(t) = i_0 \frac{dU_A}{dt} \operatorname{ch}^{-2} \xi (\operatorname{sh} \xi \operatorname{ch} \xi - G \xi). \quad (13)$$

Выражение (13) равно нулю при  $\operatorname{sh} \xi \operatorname{ch} \xi = G \xi$ . Отсюда:

$$G = (1/\xi) \operatorname{sh} \xi \operatorname{ch} \xi. \quad (14)$$

Пусть  $\xi = 0.5$  ( $U_A = U_Э$ ), тогда  $G = 1.1752$ . При иных значениях  $G$   $U_A(t)$  и  $U_Э$  будут связаны другими коэффициентами  $\xi$ .

Структурная схема измерителя представлена на рис. 3. Анализирующее воздействие генератора подается на ДПП, выход которого подключен к АП. Его выходной сигнал подается на дифференциатор 1 и далее — на один из входов умножителя 1. На второй вход этого умножителя через аттенюатор 1 и инвертирующий усилитель 1 подается анализирующее воздействие. Таким образом, на входе умножителя 1 действуют сигналы (10) и  $U_A(t)$ , а на выходе — сигнал (11).

На вход второго умножителя через аттенюатор 2 поступает отклик СДЗЛ и преобразованное в дифференциаторе 2 анализирующее воздействие с инверсией знака  $-dU_A/dt$ , так что на выходе умножителя 2 развивается сигнал (12) с противоположным знаком. Выходы умножителя 1 и 2 соединены со входами сумматора 1, на выходе которого действует сигнал (13). Выход сумматора 1 соединен со входом компаратора 2. В момент выполнения условия (14) происходит изменение его состояния, причем переход входного сигнала от отрицательного значения к положительному вызывает на выходе генерацию высокого уровня — единицу. Низкий уровень на выходе компаратора генерируется при обратном переходе и сохраняется при отрицательном входном сигнале. Такая организация работы компаратора 2 позволяет фиксировать на зондовой характеристике анализирующее напряжение, равное с точностью до постоянного коэффициента  $U_Э$ , как это было показано выше. Результаты моделирования измерителя показаны на рис. 4.

Основные результаты:

1. Разработаны методы обработки зондовых характеристик СДЗЛ, исключаящих влияние ионного тока на конечные результаты измерений базовых параметров исследуемой плазмы —  $U_Э$  и  $N$ .

2. Предложенные методы исключают использование малых модулирующих воздействий, ведущих к уменьшению отношения «сигнал/помеха».
3. На основе предложенных методов разработаны структурные схемы измерительных устройств СУ.

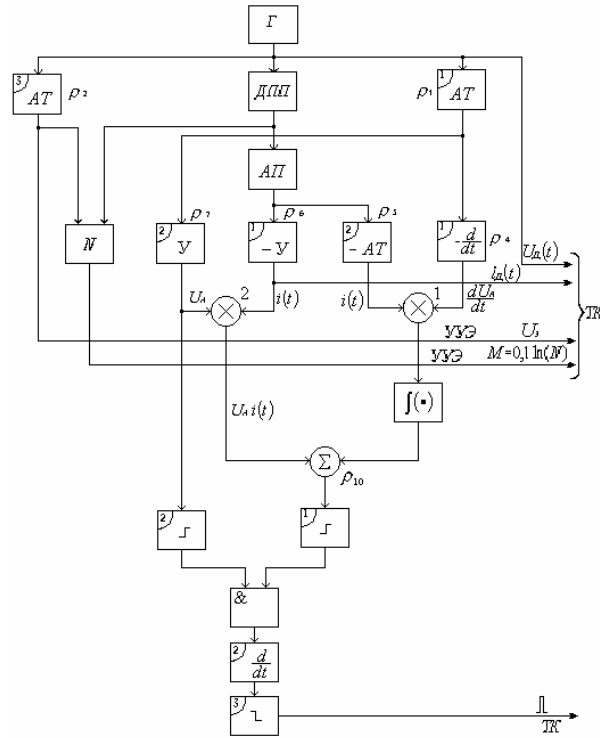


Рис. 1. Измерительное устройство СУ

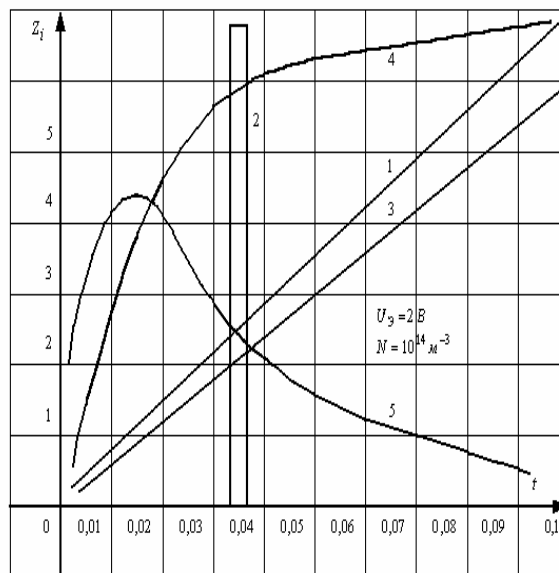


Рис. 2. Результаты моделирования схемы рис. 1

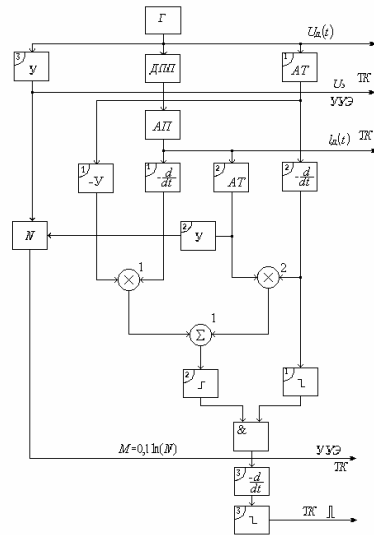


Рис. 3. Измерительное устройство СУ

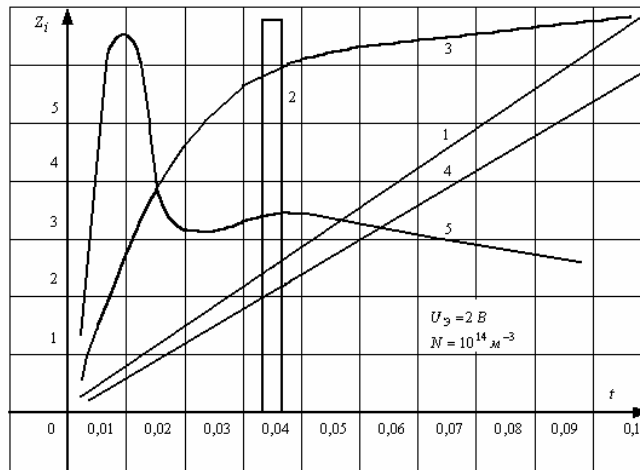


Рис. 4. Результаты моделирования измерительного устройства СУ рис. 3:

- 1 — анализирующее воздействие; 2 — строб-импульс; 3 — отклик СДЗЛ; 4 — электронная температура;
- 5 — концентрация заряженных частиц плазмы ( $M=0.1 \ln N$ )