

УДК 621.181.662

С.С. Франчук

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: ssfranchuk@gmail.com

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СВЧ ПЛАЗМОТРОНА

S.S. Franchuk

State Higher Educational Institution “National Mining University”,
Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: ssfranchuk@gmail.com

CALCULATION OF PARAMETERS OF CYLINDRICAL RESONATOR OF MICROWAVE PLASMA GENERATOR FOCUSING SYSTEM

Проведены исследования и получены аналитические зависимости для определения параметров фокусирующей системы СВЧ плазматрона и геометрических параметров цилиндрического резонатора с учетом диэлектрической проницаемости перегородок. Предложенные аналитические зависимости проверены на контрольном примере, решение которого известно. Показано, что учет перегородок приводит к существенному изменению рациональных геометрических параметров резонатора.

Ключевые слова: плазматрон, фокусирующая система, цилиндрический резонатор, электромагнитная волна, критическая длина волны

Постановка задачи. Плазматроны нашли широкое применение в промышленности для выполнения различных технологических операций. Больше преимуществ перед другими типами имеет СВЧ плазматрон, который отличается достаточной надежностью и не требует расходных материалов при эксплуатации. Основным элементом СВЧ плазматрона является система фокусировки, от правильности выбора параметров которой зависит к.п.д. установки и долговечность его работы.

Данная работа посвящена расчету и выбору параметров одного из прогрессивных видов фокусирующих систем СВЧ плазматронов – цилиндрического резонатора, позволяющего выбирать его геометрические параметры в зависимости от частоты генератора.

Электродинамический расчет. Схема цилиндрического резонатора, который имеет две диэлектрические перегородки и в котором устанавливается волна типа E_{011} , с отображенной системой координат, амплитудой волн и фазовыми постоянными, показана на рис. 1.

Плоская электромагнитная волна типа E_{01} , поляризованная в плоскости xOy , нормально падает на слой диэлектрика толщиной d (рис. 1). Для решения поставленной электродинамической задачи используется метод шивки областей. Вся область определения поля разбивается на частные области 1, 2, 3, 4 и 5 с общими границами. С учетом отражения от границ раздела сред в областях 1, 2, 3, 4, 5 будут суще-

ствовать волны, которые распространяются в противоположных направлениях, т.е. образуются стоячие волны типа E_{011} .

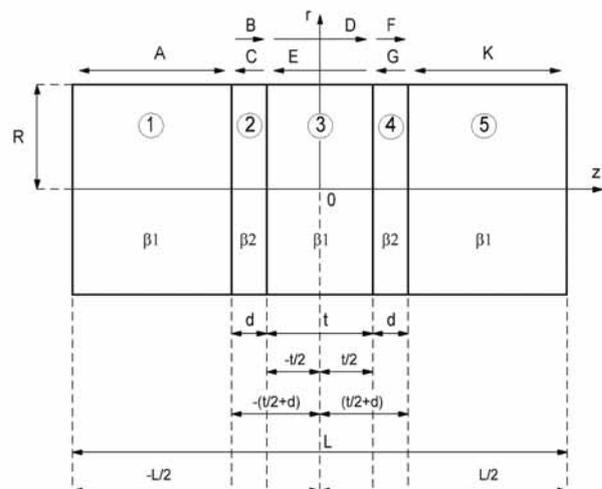


Рис. 1. Схема цилиндрического резонатора

Структура электрического и магнитного полей волны E_{01} изображена на рис. 2.

На рис. 1: A и K – комплексные амплитуды стоячих волн; B , D , F – комплексные амплитуды прямых волн (бегущие волны в направлении z); C , E , G – комплексные амплитуды обратных волн.

Для составления электродинамических уравнений используется цилиндрическая система координат.

Из [2] следует, что для волны типа E_{01} составляющие поля $E_\varphi = H_r = H_z = 0$, тогда рассматриваются только составляющие E_r и H_φ . Изменение поля вдоль оси z синусоидальное, со сдвигом фазы составляющей E_z относительно составляющих E_r и H_φ на $\pi/2$. Максимум плотности тока J_z совпадает с максимумом E_r и H_φ (рис. 2).

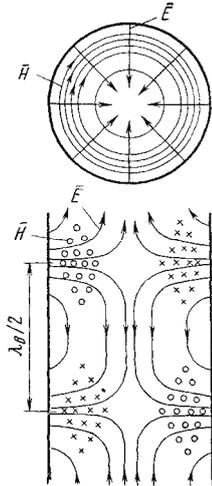


Рис. 2. Структура электрического и магнитного полей при бегущей волне типа E_{01} в круглом волноводе (в 2-х проекциях)

Коэффициент отражения от металлической стенки для электрической компоненты составляет -1 , а для магнитной 1 .

Рассматриваются волны, распространяющиеся без затухания, т.е. $\gamma = j\beta$. Выражения для комплексных амплитуд полей в областях 1, 2, 3, 4, 5 цилиндрического резонатора записываются следующим образом. Выражения для комплексной амплитуды поля в области 1

$$E_r^{(1)} = -A\beta_1\chi J_1(r\chi) \cdot 2sh[-j\beta_1(z + L/2)]; \quad (1)$$

$$H_\varphi^{(1)} = A\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi) \cdot 2ch[-j\beta_1(z + L/2)], \quad (2)$$

где E и H – векторы напряженности электрического и магнитного полей; L – длина резонатора; $J_1(r\chi)$ – функция Бесселя; r – радиус резонатора; χ – поперечное волновое число; ω – частота; ε_0 – электрическая постоянная; β_1 – фазовая постоянная для пустого волновода, которая равна

$$\beta_1 = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - \chi^2}.$$

Выражения для комплексных амплитуд поля в области 2

$$E_r^{(2)} = -B\beta_2\chi J_1(r\chi)e^{-j\beta_2z} + C\beta_2\chi J_1(r\chi)e^{j\beta_2z}; \quad (3)$$

$$H_\varphi^{(2)} = B\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi)e^{-j\beta_2z} + C\beta_2\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi)e^{j\beta_2z}, \quad (4)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость перегородок, а β_2 – фазовая постоянная для заполненного волновода, которая равна

$$\beta_2 = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \varepsilon - \chi^2}.$$

Выражения для комплексных амплитуд поля в области 3

$$E_r^{(3)} = -D\beta_1\chi J_1(r\chi)e^{-j\beta_1z} + E\beta_1\chi J_1(r\chi)e^{j\beta_1z}; \quad (5)$$

$$H_\varphi^{(3)} = D\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi)e^{-j\beta_1z} + E\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi)e^{j\beta_1z}. \quad (6)$$

Выражения для комплексных амплитуд поля в области 4

$$E_r^{(4)} = -F\beta_2\chi J_1(r\chi)e^{-j\beta_2z} + G\beta_2\chi J_1(r\chi)e^{j\beta_2z}; \quad (7)$$

$$H_\varphi^{(4)} = F\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi)e^{-j\beta_2z} + G\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi)e^{j\beta_2z}. \quad (8)$$

Выражения для комплексной амплитуды поля в области 5

$$E_r^{(5)} = -K\beta_1\chi J_1(r\chi) \cdot 2sh[-j\beta_1(z - L/2)]; \quad (9)$$

$$H_\varphi^{(5)} = K\omega\varepsilon_0\chi J_1(r\chi) \cdot 2ch[-j\beta_1(z - L/2)]. \quad (10)$$

Для рассматриваемого резонатора (рис.1), граничные условия, которые задаются в виде требований непрерывности тангенциальных компонент векторов E и H на границах раздела сред, будут выглядеть следующим образом

$$E_r^{(1)} = E_r^{(2)} \Big|_{z=-(l/2+d)}; \quad H_\varphi^{(1)} = H_\varphi^{(2)} \Big|_{z=-(l/2+d)}; \quad E_r^{(2)} = E_r^{(3)} \Big|_{z=-l/2};$$

$$H_\varphi^{(2)} = H_\varphi^{(3)} \Big|_{z=-l/2}; \quad E_r^{(3)} = E_r^{(4)} \Big|_{z=l/2}; \quad H_\varphi^{(3)} = H_\varphi^{(4)} \Big|_{z=l/2};$$

$$E_r^{(4)} = E_r^{(5)} \Big|_{z=(l/2+d)}; \quad H_\varphi^{(4)} = H_\varphi^{(5)} \Big|_{z=(l/2+d)}. \quad (11)$$

Тогда из выражений (1)–(10), с помощью выражений (11) для нахождения комплексных амплитуд волн в отдельных областях, получена система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Для оптимизации полученной СЛАУ, обе части уравнений для электрической компоненты поля отнесено к $\chi J_1(r\chi)$, а для магнитной компоненты – к $\omega\varepsilon_0$. В итоге получены линейный алгебраические уравнения в конечном виде. Уравнение для E_r в областях 1 и 2

$$-A\beta_1 \cdot 2sh \left[-j\beta_1(-t/2-d+L/2) \right] = \\ = -B\beta_2 e^{-j\beta_2 \left[-\left(\frac{t+d}{2}\right) \right]} + C\beta_2 e^{j\beta_2 \left[-\left(\frac{t+d}{2}\right) \right]}.$$

Уравнение для H_φ в областях 1 и 2

$$A \cdot 2ch \left[-j\beta_1(-t/2-d+L/2) \right] = \\ = B\epsilon\epsilon e^{-j\beta_2 \left[-\left(\frac{t+d}{2}\right) \right]} + C\epsilon\epsilon e^{j\beta_2 \left[-\left(\frac{t+d}{2}\right) \right]}$$

Уравнение для E_r в областях 2 и 3

$$-B\beta_2 e^{-j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]} + C\beta_2 e^{j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]} = \\ = -D\beta_1 e^{-j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]} + E\beta_1 e^{j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]}.$$

Уравнение для H_φ в областях 2 и 3

$$B\epsilon\epsilon e^{-j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]} + C\epsilon\epsilon e^{j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]} = \\ = D e^{-j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]} + E e^{j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]}.$$

Уравнение для E_r в областях 3 и 4

$$-D\beta_1 e^{-j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]} + E\beta_1 e^{j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]} = \\ = -F\beta_2 e^{-j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]} + G\beta_2 e^{j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]}.$$

Уравнение для H_φ в областях 3 и 4

$$D e^{-j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]} + E e^{j\beta_1 \left[\frac{t}{2} \right]} = \\ = F\epsilon\epsilon e^{-j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]} + G\epsilon\epsilon e^{j\beta_2 \left[\frac{t}{2} \right]}.$$

Уравнение для E_r в областях 4 и 5

$$-F\beta_2 e^{-j\beta_2 \left[\frac{t+d}{2} \right]} + G\beta_2 e^{j\beta_2 \left[\frac{t+d}{2} \right]} = \\ = -K\beta_1 \cdot 2sh \left[-j\beta_1(t/2+d-L/2) \right].$$

Уравнение для H_φ в областях 4 и 5

$$F\epsilon\epsilon e^{-j\beta_2 \left[\frac{t+d}{2} \right]} + G\epsilon\epsilon e^{j\beta_2 \left[\frac{t+d}{2} \right]} = \\ = K \cdot 2ch \left[-j\beta_1(t/2+d-L/2) \right].$$

Расчет геометрических параметров резонатора.

Диапазон возможных значений радиуса резонатора R выбирается из следующего условия

$$\lambda_{крE02} > \lambda_0 > \lambda_{крE01}, \quad (12)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $\lambda_{крE01}$, $\lambda_{крE02}$ – критические длины волн для волн E_{01} и E_{02} соответственно.

Условие распространения электромагнитной волны типа E_{01} выглядит следующим образом (при частоте генератора 2450 МГц)

$$a_{\min} = \frac{\lambda_0}{2,62} = \frac{122,4}{2,62} = 46,71,$$

т.е. это говорит о том, что теоретический минимальный радиус резонатора равен 46,71 мм. Из условия (12) следует, что радиусы выбираются от 47 до 107 мм, хотя при практическом расчете необходим отступ на 5–10% во избежание режима отсечки.

Для нахождения резонансных размеров цилиндрического резонатора создана программа в среде MatLab 7. Входными параметрами программы являются: рабочая частота f_0 ; геометрические размеры (R , t , d , L); относительная диэлектрическая проницаемость ϵ .

Программа работает по следующему алгоритму. По входным параметрам, кроме одного из них (для которого находится резонансное значение), формируется однородная система линейных алгебраических уравнений. В дальнейшем с определенным шагом изменяется параметр длины. Для каждого значения этого параметра рассчитывается определитель образованной системы уравнений. Значение искомой длины резонатора соответствует нулю определителя.

Ниже приведены результаты расчетов, выполненных для рабочей частоты 2450 МГц. Для наглядности на рис. 3 приведен график зависимости модуля определителя системы D от параметра L (рис. 1) для фиксированных значений следующих параметров: $f_0 = 2450$ МГц (рабочая частота); $R = 60$ мм (радиус резонатора); $t = 40$ мм (расстояние между перегородками); $d = 4$ мм (толщина перегородок); $\epsilon = 3$ (относительная диэлектрическая проницаемость перегородок).

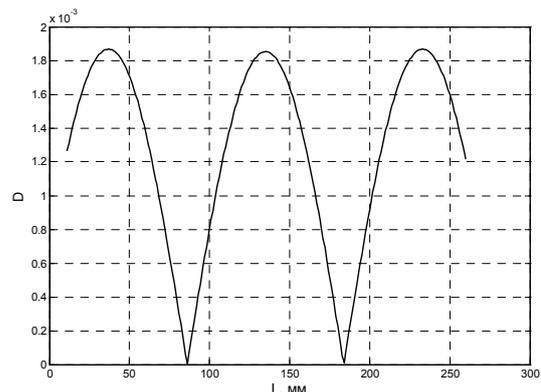


Рис. 3. Зависимость модуля определителя $D_{(mm)}$ от длины резонатора L (мм)

Из рис.3 видно, что первое значение длины резонатора L_1 равно 86 мм, что соответствует первому минимуму определителя системы.

Длина волны для круглого волновода с волной типа E_{01} определяется по известному выражению [1]

$$\Lambda = \lambda_0 / \left(\sqrt{1 - (\lambda_0 / 2,62R)^2} \right) = 195,26 \cdot \quad (13)$$

Таблиця

Расчет длины резонатора L при различных значениях радиуса R резонатора и диэлектрической проницаемости ϵ перегородок

№	R, мм	L, мм				
		$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=4$	$\epsilon=5$	$\epsilon=6$
1	55	224	219	215	210	206
2	60	189	184	179	173	167
3	65	170	165	159	153	146
4	70	159	153	147	140	133
5	75	157	145	138	131	123
6	80	145	139	132	124	117
7	85	141	134	127	120	112
8	90	137	131	123	116	108

В некоторых расчетах это значение принимается за основу при определении длины резонатора, при этом за базовую принимают как полную, так и половину длины волны.

Согласно нашим исследованиям фокусировка электромагнитной волны будет более устойчивой, если ориентироваться на полную длину волны. Для рассматриваемого типа резонатора, с учетом перегородок из диэлектрика, длина резонатора L_2 составит 184 мм, которая соответствует длине волны, определяемой по выражению (13).

Адекватность разработанной модели и правильность принятых допущений были проверены на модели двухслойного цилиндрического резонатора (содержащего одну перегородку с $\epsilon = 1$) со следующими входными параметрами: $R = 60$ мм; $f_0 = 2450$ МГц; $\epsilon = 1$. На рис. 4 изображен график результатов моделирования.

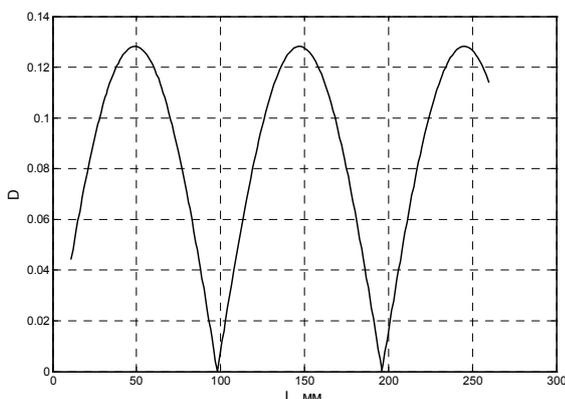


Рис. 4. Зависимость модуля определителя $D_{(mn)}$ от длины резонатора L (мм) для двухслойного цилиндрического резонатора

Из рис. 4 получены следующие значения минимумов определителя (значения резонансной длины резонатора): $L_1 = 98$ мм; $L_2 = 196$ мм. Сравнивая значение L_2 с значением Λ из формулы (13) видно достаточно хорошее совпадение данных, что подтверждает правильность разработанной математической модели.

Для изготовления резонатора целесообразно использовать латунь или медь, обеспечивающие минимальное затухание электромагнитных волн. Диэлектрические перегородки следует выбирать из диэлектрических материалов с низким тангенсом угла потерь – для предотвращения их чрезмерного нагрева. Для этого наиболее приемлемыми являются СВЧ диэлектрики таких типов, как: Брикон АА-2.0; Брикон АА-2.2; Брикон АТ-2.4; Флан-М; ФФ-4; ФАФ-4Д.

В таблице приведен расчет длины резонатора при фиксированных значениях $f = 2450$ МГц, $d = 4$ мм, $t = 40$ мм.

Выводы. Аналитические исследования показывают, что при определении геометрических параметров резонатора необходимо ориентироваться на полную длину электромагнитной волны. При учете диэлектрических перегородок линейный размер отличается от длины электромагнитной волны в резонаторе. В дальнейших исследованиях необходимо учесть, что для предотвращения перегрева перегородок необходимо располагать их асимметрично относительно резонатора.

Список литературы / References

1. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: учебное пособие для вузов / Григорьев А.Д. – М.: Высшая школа, 1990. – 336 с.
Grigoryev A.D. Electrodynamics and microwave technique: higher school textbook / Grigoryev A.D. – М.: Vysshaya shkola, 1990. – 336 p.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ / Лебедев И.В. – М.: Высшая школа, 1970. – 438 с.
Lebedev I.V. Technique and microwave devices / Lebedev I.V. – М.: Vysshaya shkola, 1970. – 438 p.
3. Ефимов И.Е. Волноводные линии передачи / Ефимов И.Е., Шермина Г.А. – М.: Связь, 1979. – 232 с.
Yefimov I.Ye. Waveguide transmission line / Yefimov I.Ye., Shermine G.A. – М.: Svyaz, 1979. – 232 p.
4. Григорьев А.Д. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ / А.Д. Григорьев, В.Б. Янкевич. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
Grigoryev A.D. Resonators and resonator microwave slow-wave structure / A.D. Grigoriev, V.B. Yankevich. – М.: Radio i Svyaz, 1984. – 248 p.
5. Ширман Я.Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы / Ширман Я.Д. – М.: Гос. изд. Лит-ры по вопр. связи и радио, 1959. – 380 с.
Shirman Ya.D. Radio waveguides and cavity resonators / Shirman Ya.D. – М.: Gos. izd. Lit-ry po voпр. svyazi i radio, 1959. – 380 p.

Проведено дослідження й отримано аналітичні залежності для визначення параметрів фокусуєчої системи НВЧ плазмотрона й геометричних параметрів циліндричного резонатора з урахуванням діелектричної проникності перегородок. Запропоновано аналітичні залежності перевірені на контрольному

прикладі, рішення якого відомо. Показано, що урахування перегородок приводить до істотної зміни раціональних геометричних параметрів резонатора.

Ключові слова: *плазмотрон, фокусуюча система, циліндричний резонатор, електромагнітна хвиля, критична довжина хвилі*

Investigations were carried out and analytical expressions for determining of the parameters of the focusing system of microwave plasma torch and the geometric parameters of a cylindrical cavity taking into account dielec-

tric conductivity of partitions were obtained. Proposed analytical dependencies were checked on the test case, solution of which is known. It is shown that the inclusion of barriers leads to a significant change of Geometrical Parameters of the resonator.

Keywords: *plasma generator, focusing system, cylindrical cavity, electromagnetic wave, critical wavelength*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.К. Младецьким. Дата надходження рукопису 04.03.11

УДК 621.181.662

А. Кровяк, д-р техн. наук

Главный Институт Горного Дела, г. Катовице, Польша,
e-mail: akrowiak@gig.katowice.pl

МЕТОД СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ВАРИАНТНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА НА ПРИМЕРЕ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ КАМЕННОГО УГЛЯ

A. Krowiak, Dr. Sci. (Tech.)

Central Mining Institute, Kratowice, Poland,
e-mail: akrowiak@gig.katowice.pl

METHOD OF CREATION OF DIGITAL MODEL OF VARIANT CALCULATIONS OF INVESTMENT PROJECT PROFITABILITY ON EXAMPLE OF HARD COAL UNDERGROUND GASIFICATION

Представлена цифровая модель, исходя из определения группы функций, позволяющих определить основные экономические показатели проекта на основании произвольно выбранных комбинаций исходных данных. Для построения модели были использованы функции линейной и нелинейной регрессии, выстраиваемые на основании выбранных пакетов данных.

Ключевые слова: *экономика, цифровые модели, анализ регрессии, инвестиционный проект, подземная газификация угля*

Введение. В данной статье представлен метод создания цифровой модели для расчета рентабельности проекта на примере процесса подземной газификации угля. Исходя из того, что темой данной статьи является построение модели, в ней мы не будем подробно описывать непосредственно технический и технологический проект процесса подземной газификации угля. В качестве исключения можно сказать, что указанный процесс будет осуществляться скважинным методом с поверхности земли, с дальнейшим приведением ссылок для заинтересованных читателей на предметную литературу [1].

Под цифровой моделью понимается определение группы функций, позволяющих определить основные экономические показатели проекта на основании произвольно выбранных комбинаций исходных данных. Для построения модели были использованы функции линейной и нелинейной регрессии, выстраиваемые на основании выбранных пакетов данных [2]. Для выполнения текущих расчетов был использован программный пакет СТАТИСТИКА, в. 9.0 (STATISTICA v.9.0) [3].

Терминология и понятия. Результатом применения модели является определение значений экономических показателей, пояснения которых приведены ниже:

NPV (Net Present Value) – *чистая текущая приведенная стоимость (чистый дисконтированный доход, ЧДД)* – является суммой приведённых к сегодняшнему дню дисконтированных значений потока платежей за отдельные периоды, охваченные анализом. Данное соотношение рассчитывается в злотых, с точностью до заданного временного отрезка, в пределах периода от начала до окончания реализации проекта. Отрицательное значение указанного показателя для данной дисконтной ставки R_d свидетельствует о нерентабельности проекта. Чем большим является его положительное значение, тем более рентабельным считается проект. Данный показатель определяет рентабельность всего проекта для заданной дисконтной ставки R_d .

NPVR – соотношение между *чистой текущей приведенной стоимостью (чистого дисконтированного дохода) / ЧДД/* и суммой дисконтированных инвестиционных затрат, связанных с началом реализации проекта. Рассчитывается в единицах (зл. / зл). Отображает соотношение между полученной прибылью и денежными затратами для реализации всего