



eISSN 2311-2468
Том 4, № 18. 2016
Vol. 4, no. 18. 2016

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



СУРАЙКИН А. И., СУМЕНКОВ А. Н.

**ВАРИКАПЫ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ
GaAs-СТРУКТУР ДЛЯ ВЧ-АППАРАТУРЫ**

Аннотация. Представлены результаты разработки и исследования полупроводниковых мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов для широкого применения в высокочастотной аппаратуре. Приводятся общие технические требования к *GaAs*-варикапам, а также основные электрические параметры и характеристики экспериментальных образцов мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов.

Ключевые слова: арсенид галлия, варикап, мезаэпитаксиальная структура, ёмкость, добротность, коэффициент перекрытия по ёмкости.

SURAYKIN A. I., SUMENKOV A. N.

**VARACTOR DIODES BASED ON MULTILAYER EPITAXIAL
GaAs-COMPOSITION FOR HIGH-FREQUENCY EQUIPMENT**

Abstract. The article presents the results of designing and studying of semiconductor mesaepitaxial *GaAs*-varactor diodes for general application in high-frequency equipment. The study provides the general technical requirements for *GaAs*-varactor diodes and the electrical parameters of the experimental mesaepitaxial *GaAs*-varactor diodes.

Keywords: gallium arsenide, varactor diode, mesaepitaxial composition, capacity, quality factor, coefficient of capacity overlap.

Одно из направлений развития электронной компонентной базы *ВЧ*-электроники – полупроводниковые приборы с управляемой ёмкостью, работающие в широком диапазоне управляющего напряжения и широком диапазоне рабочих температур. Разработка и производство данных приборов вполне реализуемо на основе многослойных эпитаксиальных *GaAs*-структур.

Применение *GaAs* для производства варикапов актуально ещё и тем, что он в некотором смысле отвечает приближению идеального полупроводника для варикапов. Идеальный полупроводник для варикапа должен иметь те или иные носители заряда с высокой подвижностью, обладать низкой диэлектрической проницаемостью, широкой запрещённой зоной, низкой энергией ионизации примесей и высокой теплопроводностью. Эти параметры обеспечивают минимальное сопротивление, минимальную ёмкость, небольшой ток насыщения, а также возможность работы при повышенных температурах.

За рубежом и на ряде российских предприятий имеется технология производства многослойных эпитаксиальных *GaAs*-структур. На сегодняшний день на основе таких

структур разработаны быстродействующие высоковольтные $p-i-n$ -диоды для преобразовательной и импульсной техники [1, с. 35–37]. Применение технологии производства быстродействующих высоковольтных $p-i-n$ -диодов для изготовления мезаэпитаксиальных GaAs-варикапов позволяет создать необходимые предпосылки для разработки высокодобротных варикапов с широким диапазоном рабочего напряжения.

Использование в GaAs-диодных структурах зависимости барьерной ёмкости от приложенного обратного напряжения с последующим нормированием этой зависимости позволяет реализовать такой полупроводниковый прибор, как варикап. Характер этой зависимости, то есть вольт-фарадной характеристики, определяется видом распределения концентрации примесей в области объемного заряда $p-n$ -перехода и, соответственно, методом его изготовления. Эти зависимости получены аналитически и достаточно известны как для резких $p-n$ -переходов, так и для плавных $p-n$ -переходов [2]. В данной работе сделана попытка получения варикапа на основе технологии формирования мезаэпитаксиальных диодных структур с резким $p-n$ -переходом.

Основные требования к мезаэпитаксиальным GaAs-варикапам для ВЧ-аппаратуры кратко можно представить в следующем виде:

1) ёмкость варикапа при обратном напряжении – $U_R=4$ В: 220–280 пФ (первый вариант исполнения – одиночные кристаллы), 55÷80 пФ (второй вариант исполнения – два варикапа на одном кристалле);

2) добротность варикапа при обратном напряжении – $U_R=4$ В: не менее 200 (первый вариант исполнения – одиночные кристаллы), не менее 120 (второй вариант исполнения – два варикапа на одном кристалле);

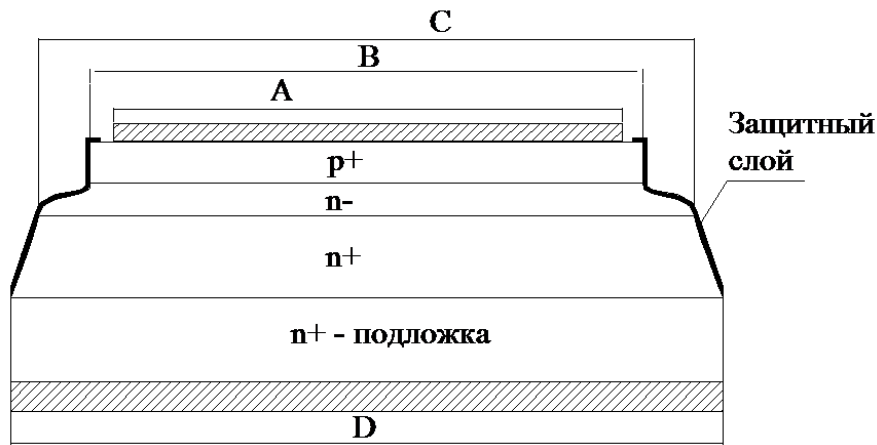
3) коэффициент перекрытия по ёмкости варикапа (отношение ёмкости варикапа при $U_R=4$ В к ёмкости варикапа при $U_R=100$ В): не менее 3,5;

4) постоянный обратный ток варикапа при $U_R=100$ В в рабочем диапазоне температур – не более 1 мкА;

5) рабочий диапазон температуры окружающей среды от -60 до $+85$ °С.

Структура кристалла мезаэпитаксиального GaAs-варикапа приведена на рисунке 1.

Структура, приведенная на рисунке 1 формируется методами жидкофазной эпитаксии. Полученные эпитаксиальные $p^+-n^-n^+-n^+$ -структуры имеют несколько металлургических переходов внутри структуры [3, с. 36–47].



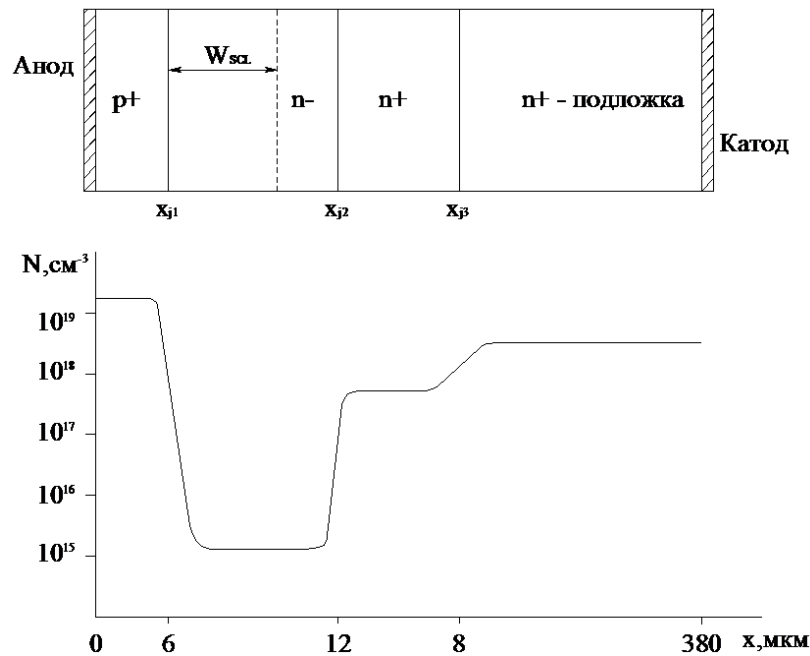
А – контакт анода, В – анодная область (p^+), С – высокоомная n -область, D – катод.
В качестве защитного слоя могут использоваться диэлектрические плёнки SiO_2 и Si_3N_4 ,
а также полимерные материалы типа фотоимидов

Рис. 1. Структура кристалла GaAs-варикапа.

Физическая структура и распределение концентрации в $p^+n^-n^+n^+$ -структуре кристалла варикапа приведена на рисунке 2. Принимая в расчет общую протяженность эпитаксиальных областей и подложки GaAs-варикапа такой, как показано на рисунке 2, то на переходах x_{j1} , x_{j2} , x_{j3} возникают диффузионные потенциалы, сумма которых дает полное диффузионное напряжение такое же, как и на GaAs p - i - n -диоде при $T=300\text{ K}$ [1–2]:

$$U_{VD} = U_{xj1} + U_{xj2} + U_{xj3} \leq 1,2B. \quad (1)$$

Так как варикап представляет собой, прежде всего, диодную структуру, то практически все параметры, включая присущие непосредственно варикапам, определяются удельным сопротивлением и толщиной высокоомного эпитаксиального слоя. В этом факте содержится как положительный момент (весь расчет варикапа мы можем свести к расчету параметров высокоомного эпитаксиального слоя), так и небольшой минус: неконтролируемое изменение параметров высокоомной эпитаксиальной пленки, а также параметры всех остальных эпитаксиальных слоев, включая паразитные сопротивления металлических контактов приводят к заметному разбросу ряда электрических параметров, таких как ёмкость и добротность.



W_{SCL} – область пространственного заряда в высокоомном эпитаксиальном слое.

Рис. 2. Физическая структура и распределение концентрации носителей заряда в структуре *GaAs*-варикапа.

Поэтому, в конечном итоге, только исследование экспериментальных образцов варикапов с последующей нормировкой значений электрических параметров позволяет оптимизировать структуру кристалла варикапа.

Используя формулу плоского конденсатора, для структуры, приведенной на рисунке 2, можно записать:

$$C_{VD} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{pn}}{W_{SCL} (U_R)}, \quad (2)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость *GaAs*,

ε_0 – электрическая постоянная;

S_{pn} – площадь *p-n*-перехода варикапа;

W_{SCL} – ширина области пространственного заряда высокоомного эпитаксиального слоя (базы), зависящая от приложенного обратного напряжения – U_R .

Учитывая, что разрабатываемые варикапы на основе *GaAs* выполнены полностью по эпитаксиальной технологии с разностью концентраций в несколько порядков, то вполне приемлемо приближение «Резкого» асимметричного *p-n*-перехода. Для такого перехода, в

приближении обеднения (при обратных напряжениях), ёмкость можно аппроксимировать следующим соотношением [4, с. 80–88]:

$$C_{VD} = S_{pn} \cdot \sqrt{\frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_D}{2 \cdot (U_{pn}^* + U_R)}}, \quad (3)$$

где N_D – концентрация донорной примеси в базовой области варикапа (высокоомном эпитаксиальном слое);

U_{pn}^* – контактная разность потенциалов p – n -перехода варикапа.

Принимая во внимание то, что ёмкость варикапов (C_{VD}) и диапазон обратных напряжений (U_R), как правило, оговариваются в исходных технических требованиях, а контактную разность потенциалов – U_{pn}^* можно вычислить в соответствии с (1), то на основании (3) можно определить в первом приближении площадь варикапов при уровне легирования базовой области $(1 \div 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$:

$$S_{pn} = C_{VD} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (U_{pn}^* + U_R)}{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_D}}. \quad (4)$$

Использования соотношения (4) при разработке варикапов удобно тем, что одну и ту же структуру мы можем использовать для изготовления двух типов варикапов.

а) При обратном напряжении $U_R=4 \text{ В}$ и ёмкости $C_{VD}=250 \text{ пФ}$ мы получим значение площади p – n -перехода для первого варианта исполнения варикапа – $S_{pn} \approx 5,5 \text{ мм}^2$.

б) При обратном напряжении $U_R=4 \text{ В}$ и ёмкости $C_{VD}=68 \text{ пФ}$ мы получим значение площади p – n -перехода для второго варианта исполнения варикапа – $S_{pn} \approx 1,6 \text{ мм}^2$.

Толщину высокоомного эпитаксиального (базового) слоя h_{Bepi} выберем исходя из условия, что данная величина должна быть больше ширины области пространственного заряда (ОПЗ) W_{SCLmax} при максимальном обратном напряжении U_{Rmax} в (5).

$$h_{Bepi} > W_{SCLmax} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (U_{pn}^* + U_{Rmax})}{q \cdot N_D}}. \quad (5)$$

Согласно (5), при $U_{Rmax} = 100 \text{ В}$, получим $W_{SCLmax} \approx 12 \text{ мкм}$.

Таким образом, на основании полученных данных выбор толщины высокоомного эпитаксиального (базового) слоя $h_{Bepi} > 12 \text{ мкм}$ вполне приемлем.

Все вышеприведенные параметры – концентрация донорной примеси в базовой области варикапа, толщина эпитаксиального слоя базовой области варикапа – непосредственно связаны с величиной добротности (6).

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{VD} \cdot R_{VD}}, \quad (6)$$

где C_{VD} – общая ёмкость варикапа при некотором заданном обратном напряжении – U_R ;

$f=50$ МГц – частота переменного напряжения, на которой осуществляется измерение добротности при некотором заданном обратном напряжении – U_R ;

R_{VD} – общее активное сопротивление структуры варикапа, с приемлемой точностью можно принять равным сопротивлению базовой области варикапа (сопротивлением контактов и высоколегированных областей можно пренебречь).

С учетом вышесказанного, общее активное сопротивление структуры варикапа [5, с. 147–303]:

$$R_{VD} \approx R_B = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot N_D} \cdot \frac{W_B}{S_{pn}} = \rho_B \cdot \frac{W_B}{S_{pn}}, \quad (7)$$

где $\rho_B = \frac{1}{q \cdot \mu_n \cdot N_D}$ – удельное сопротивление базовой области варикапа;

S_{pn} – площадь p – n -перехода варикапа;

W_B – толщина квазинейтральной области базы варикапа.

Толщину квазинейтральной области базы варикапа можно вычислить следующим образом (рис. 2):

$$W_B = h_{Bepi} - W_{SCL} = x_{j2} - x_{j1} - W_{SCL}, \quad (8)$$

где h_{Bepi} – толщина эпитаксиального слоя базовой области;

W_{SCL} – ширина ОПЗ в базовой области варикапа.

Соотношение (7) показывает преимущества применения полупроводниковых материалов с высокой подвижностью носителей заряда для изготовления варикапов. В данном случае применение $GaAs$ для изготовления варикапов со структурой, приведенной на рис. 1, обеспечивает подвижность электронов в базовой области – $\mu_n \approx 5000$ см²/В.с (для сравнения, в кремнии – $\mu_n \approx 1420$ см²/В.с). Это обеспечивает более низкие, по сравнению с Si , значения полного активного сопротивления варикапов и, как следствие, на основании (6), более высокие значения добротности $GaAs$ -варикапов.

Следует отметить, что и при расчете, и при измерении толщины и удельного сопротивления базового слоя варикапа имеет место существенная погрешность. Кроме всего,

что связано непосредственно с объемом структуры варикапов на параметры существенное влияние оказывает поверхность («Меза»-область), где имеют место нарушения кристаллической структуры и, как следствие, высокая плотность зарядовых состояний. Структура «Меза»-области приведена на рисунке 3.

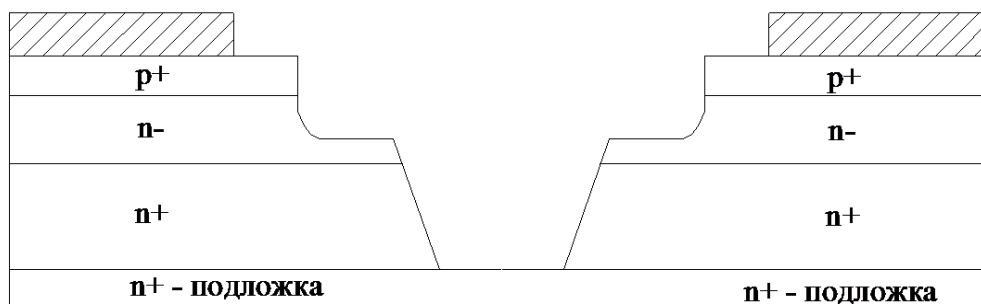


Рис. 3. Структура «Меза»-области кристаллов варикапов.

Поэтому на практике чаще всего сопротивление R_{VD} устанавливают экспериментальным путем на основе измерения динамического сопротивления прямой ветви вольтамперной характеристики варикапа.

После сборки экспериментальных образцов *GaAs*-варикапов (корпус типа ТО-251), было проведено исследование их вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик. Также было проведено измерение добротности.

Вольт-фарадные характеристики 10 штук экспериментальных образцов варикапов первого типа (одиначные кристаллы) при $T=300\text{ K}$ приведены на рисунке 4.

Исследуя рисунок 4 можно отметить, что линейность вольт-фарадных характеристик наблюдается практически во всем рабочем диапазоне обратных напряжений, начиная от 4 В и до 100 В. Лишь на участке менее 4 В наблюдается резкое возрастание ёмкости, но это не регламентированный для работы интервал обратных напряжений.

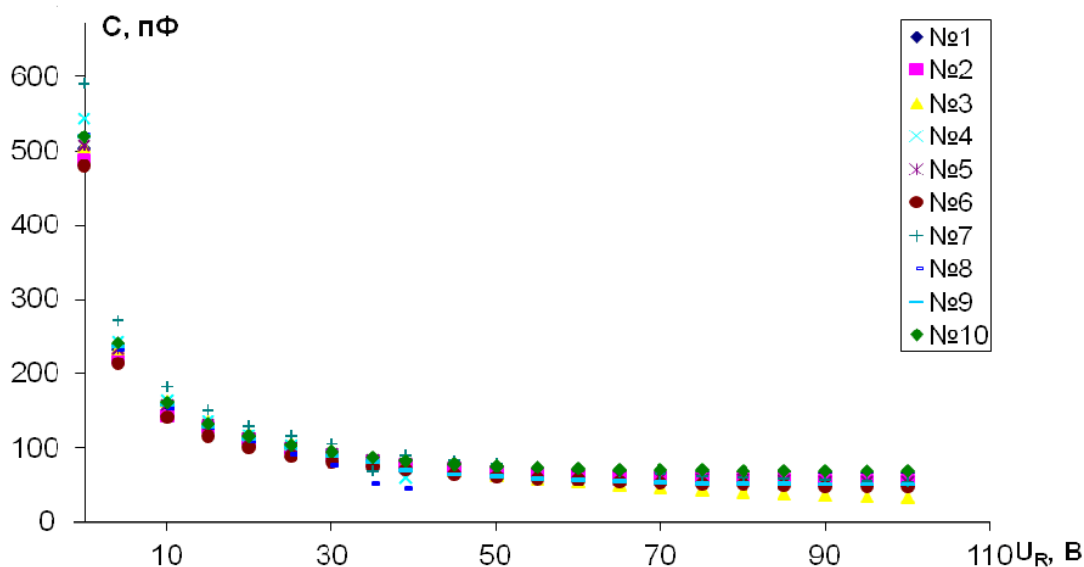


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики десяти экспериментальных образцов *GaAs*-варикапов первого типа (одиночные кристаллы) при $T=300$ K.

Вольт-фарадные характеристики 10 шт. экспериментальных образцов варикапов второго типа (сдвоенные кристаллы) при $T=300$ K приведены на рисунке 5.

Рисунок 5 показывает результат аналогичный предыдущему (см. рис. 4) с точки зрения линейности характеристики. Отличие в том, что величина ёмкости данного варикапа ниже, чем у предыдущего варианта (измерения проводились на одном, произвольно выбранном варикапе).

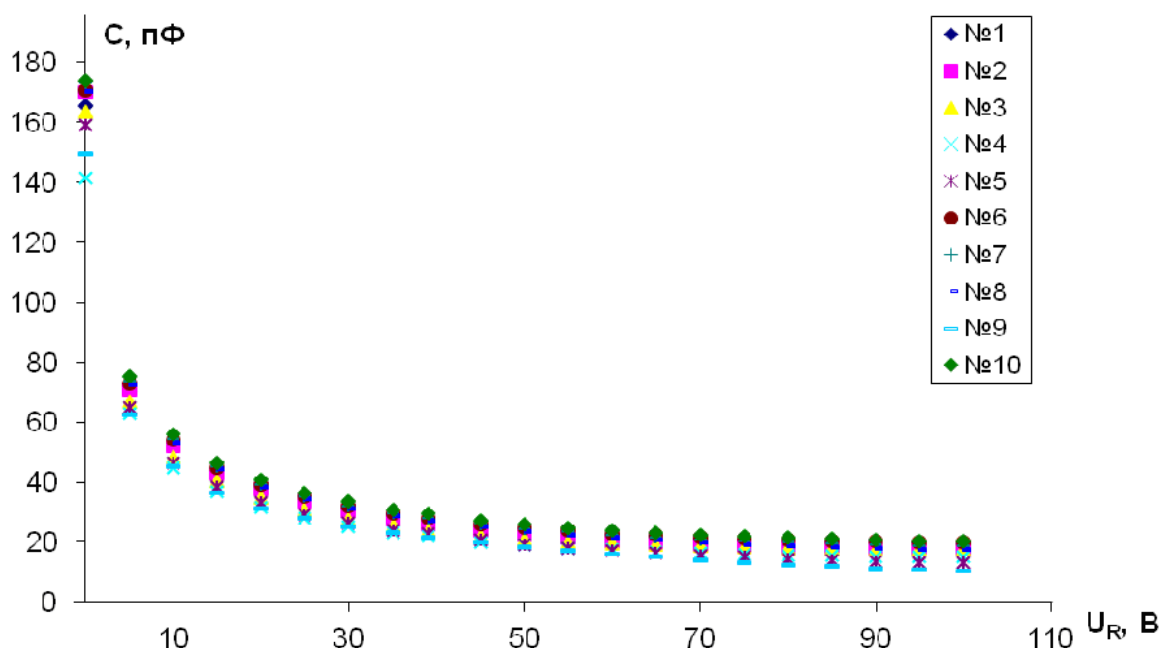


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики 10 шт. экспериментальных образцов *GaAs*-варикапов второго типа (два варикапа на одном кристалле) при $T=300$ K.

Измерение добротности варикапов, а также зависимости данной добротности от частоты проводилось с помощью измерителя добротности Е4-11. Результаты измерения приведены на рисунках 6 и 7.

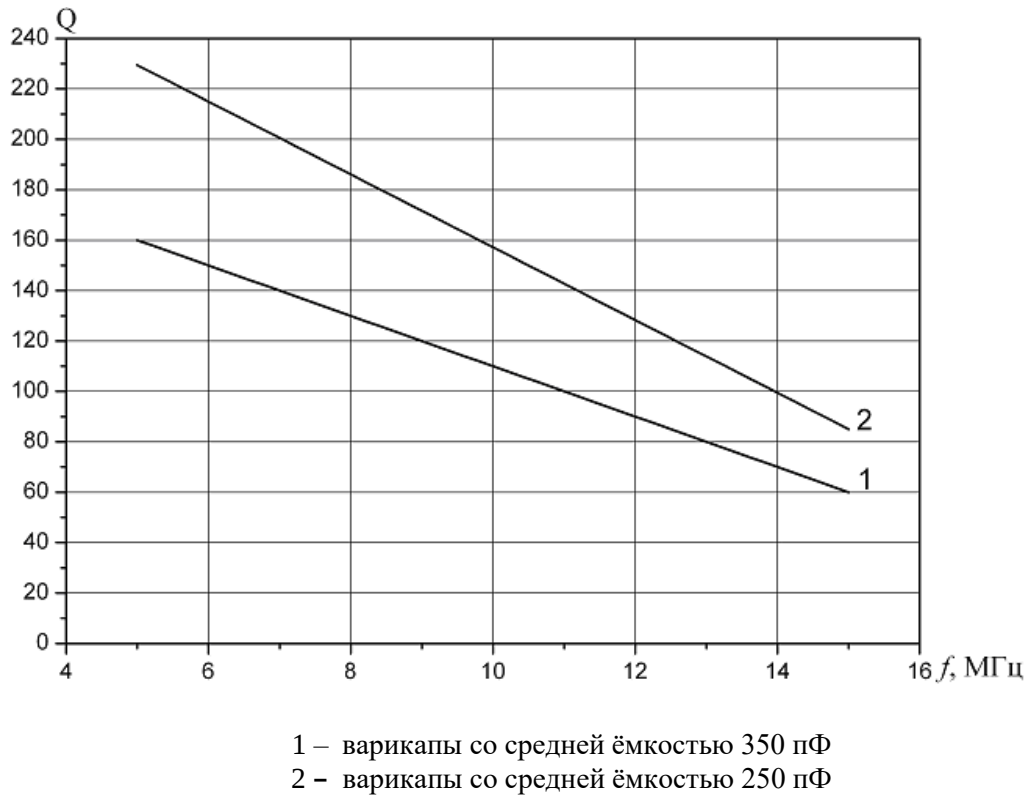


Рис. 6. Аппроксимированная зависимость добротности варикапов первого типа от частоты.

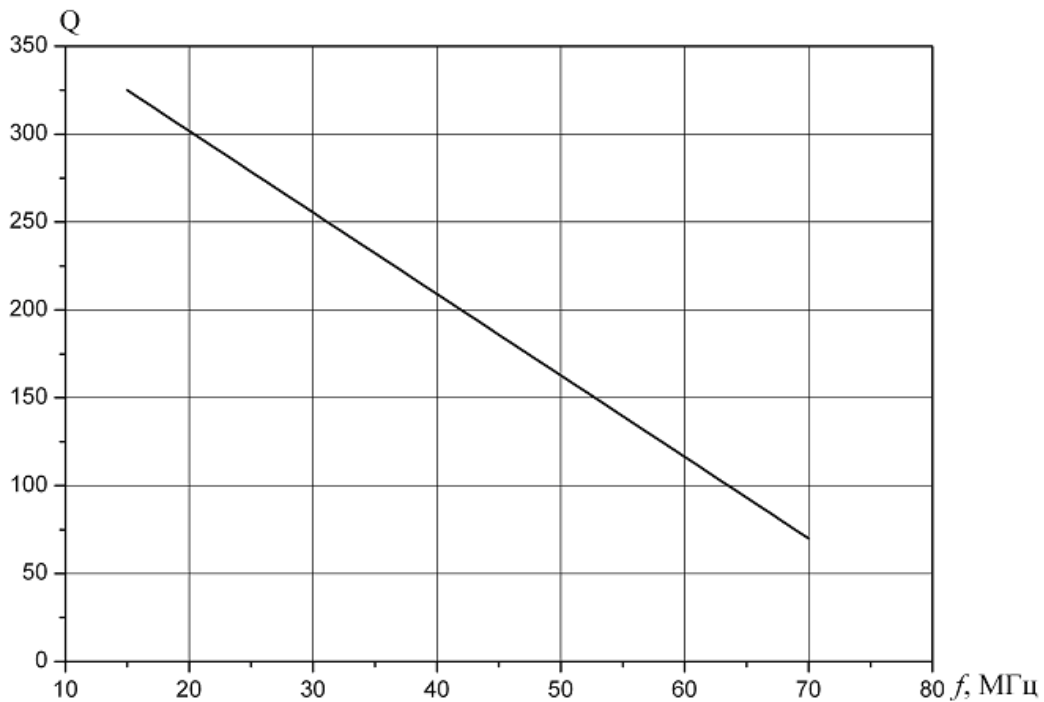


Рис. 7. Аппроксимированная зависимость добротности варикапов второго типа от частоты (среднее значение ёмкости – 68 пФ).

В результате проведенной работы выполнен расчет физической структуры мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов двух типов: однокристалльный вариант и вариант с двумя варикапами на одном кристалле. Изготовлены экспериментальные образцы мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов, проведено исследование их электрических параметров и характеристик.

В результате исследования электрических характеристик мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов, включая вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики установлено, что полученные зависимости позволяют использовать их наряду с кремниевыми варикапами в радиотехнической аппаратуре общепромышленного применения. Более широкий диапазон рабочих напряжений мезаэпитаксиальных *GaAs*-варикапов позволяет применять их более широко, включая высоковольтную аппаратуру. Полученные значения добротности варикапов, величины которых превосходят добротности аналогичных кремниевых варикапов, обеспечивают возможность применения мезаэпитаксиальных *GaAs* – варикапов в *ВЧ*- и *СВЧ*-аппаратуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сурайкин А. И. Быстродействующие высоковольтные *GaAs*-диоды для преобразовательной техники и импульсных устройств // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 2. – С. 35–37.
2. Сурайкин А. И., Федотов Е. Н. Быстродействующие высоковольтные *GAAS* диоды для силовой электроники [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2014. – № 22. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/bystrodejstvuyushhie-vysokovoltnye-gaas-diody-dlya-silovojj-ehlektroniki>.
3. Арсенид галлия. Получение, свойства, применение / Под ред. Ф. П. Кесаманлы, Д. Н. Наследова. – М.: Наука, 1973. – 472 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1. / Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Уотсон Г. *СВЧ*-полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Г. Уотсона. – М.: Мир, 1972. – 662 с.

ИОНЫЧЕВ В. К., ШЕСТЕРКИНА А. А., КАДЕРКАЕВ Р. Р., СИМДЯНКИН М. И.
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
МИКРОПЛАЗМЕННОГО ПРОБОЯ В P - N -ПЕРЕХОДАХ

Аннотация. Приведено описание метода и установки для исследования микроплазменного пробоя p - n -перехода. Показано, что задержка лавинного пробоя позволяет определять параметры глубоких центров, локализованных в микроплазменных каналах p - n -переходов, что невозможно определить другими методами.

Ключевые слова: микроплазменный пробой, задержка лавинного пробоя, глубокие центры.

IONYSHEV V. K., SHESTERKINA A. A., KADERKAEV R. R., SIMDYANKIN M. I.
COMPUTER-ASSISTED APPARATUS FOR RESEARCHING
MICROPLASMA BREAKDOWN IN P - N JUNCTIONS

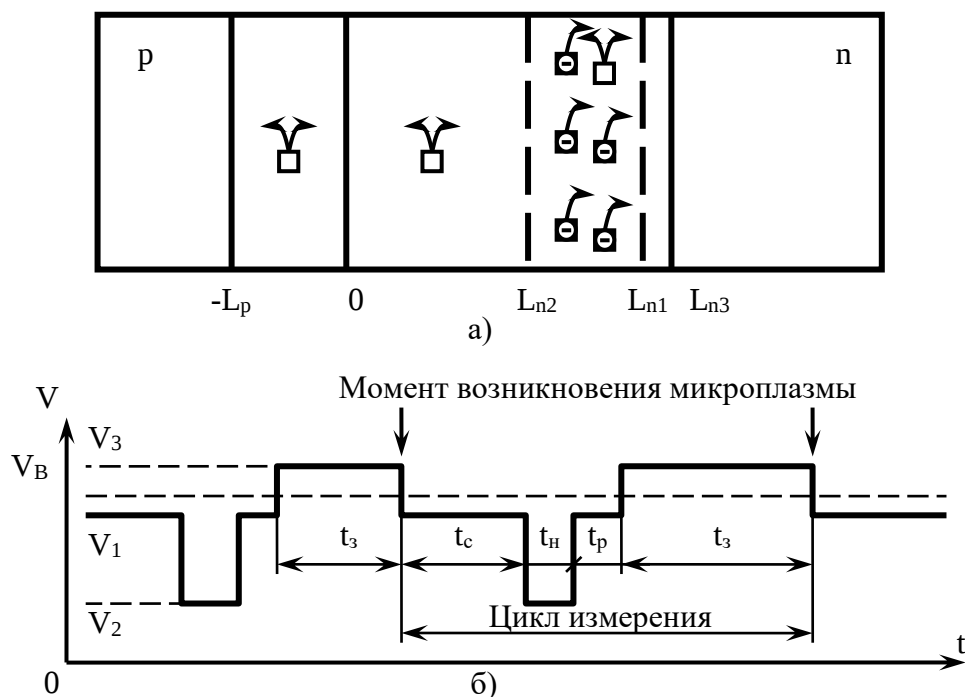
Abstract. The paper gives a description of the method and apparatus for defining of the p - n junction microplasma breakdown. It is shown that the delay of microplasma breakdown allows us to define deep center parameters located in microplasma channels of p - n junctions and there are no other ways to do that.

Keywords: microplasma breakdown, delay of microplasma breakdown, deep centers.

В формировании обратных вольтамперных характеристик p - n -переходов определяющую роль играют генерационно-рекомбинационные процессы с участием глубоких центров. В полупроводниковых диодах они могут приводить к увеличению обратных токов, изменению напряжения пробоя, неоднородностям пробоя по площади кристалла, релаксационным процессам и т.д.

В свою очередь генерационно-рекомбинационные процессы с участием глубоких центров (ГЦ) влияют на лавинный пробой p - n -переходов. Лавинный пробой p - n -переходов сильно локализован. В основном он развивается в местах скопления различного рода дефектов. Области локального пробоя имеют очень малые геометрические размеры и существенно меньшее напряжение пробоя по сравнению с однородными областями. Эти области сильно локализованного пробоя были названы микроплазмами [3]. Одним из основных проявлений микроплазменного эффекта в p - n -переходах является импульсный характер лавинного тока. Длительности импульсов и пауз между ними случайны. Исследование лавинного пробоя и, в частности, его задержки позволяет изучать центры, расположенные непосредственно в микроплазменных каналах, что невозможно другими методами.

Суть метода состоит в следующем. Для примера рассмотрим p - n -переход, в котором имеются равномерно распределенные глубокие центры с энергетическим уровнем в верхней половине запрещенной зоны и коэффициент эмиссии электронов с глубоких центров намного больше коэффициента эмиссии дырок $e_n \gg e_p$ (см. рис. 1а).



а) Схематическое изображение p - n -перехода
б) Временные диаграммы напряжения на p - n -переходе

Рис. 1. К методу определения параметров глубоких центров по статистической задержке микроплазменного пробоя.

Пусть p - n -переход находится при такой температуре, при которой уровень Ферми в n -базе выше глубокого уровня. Таким образом, все глубокие уровни со стороны n -базы до области пространственного заряда (ОПЗ) (до L_{n1}) будут заполнены электронами. Изменяя обратное напряжение на p - n -переходе можно изменять область, в которой на глубокие центры будут захвачены электроны (от L_{n1} до L_{n2}). Следовательно, можно точно указать место в p - n -переходе, где будет происходить эмиссия электронов с глубоких центров, что очень важно. Поскольку при исследовании вероятности включения микроплазмы при заполнении глубоких центров в микроплазменном канале необходимо точно знать местоположение области эмиссии носителей, участвующих в запуске лавины, так как коэффициент ударной ионизации зависит от электрического поля. На рисунке 1б приведена временная диаграмма напряжения на исследуемом диоде. Для создания области эмиссии электронов с глубоких центров на p - n -переход в обратном направлении подается прямоугольный импульс напряжения V_2 длительностью t_n , и измеряется статистическая задержка микроплазменного пробоя t_3 . Параметры импульсов выбираются из следующих

предпосылок. Интервал времени t_c определяется временем установления стационарного состояния в микроплазменном канале. Длительность ступеньки t_n должна быть гораздо меньше времени перераспределения заряда на ГЦ под действием электрического поля в области от $-L_p$ до L_{n1} (рис. 1а), и в тоже время, чтобы ГЦ в области от L_{n1} до L_{n2} заполнились основными носителями заряда (электронами) со стороны n -базы. Реализовать такой режим измерений возможно, т.к. скорость захвата обычно гораздо больше скорости эмиссии носителей заряда с ГЦ. Регулировать степень заполнения глубоких центров можно с помощью ступеньки напряжения t_p . Напряжение V_B – напряжение пробоя первой микроплазмы. Напряжение V_3 – незначительно (на несколько процентов) превышает V_B . Напряжение V_1 – несколько ниже V_B (на 5–10 мВ). Напряжением V_2 – регулируется область заполнения ГЦ электронами.

Эмиссия носителей заряда с глубоких центров влияет на статистическую задержку пробоя и может при определенных условиях практически полностью ее определять, даже в тех случаях, когда концентрация ГЦ на много порядков величины меньше значения концентрации легирующих примесей [1]. Если же концентрация ГЦ в микроплазменных каналах сравнима с концентрацией легирующих примесей, то перезарядка ГЦ приводит к релаксационной задержке лавинного пробоя p – n -перехода [2].

Измерение статистической задержки микроплазменного пробоя включает 2 этапа [4].

Первый этап. Измерение вероятности включения микроплазмы без специального заполнения глубоких центров в микроплазменном канале (фоновый запуск лавины). Функция распределения задержки пробоя P_M в полулогарифмических координатах представлена на рисунке 2 (кривая 1).

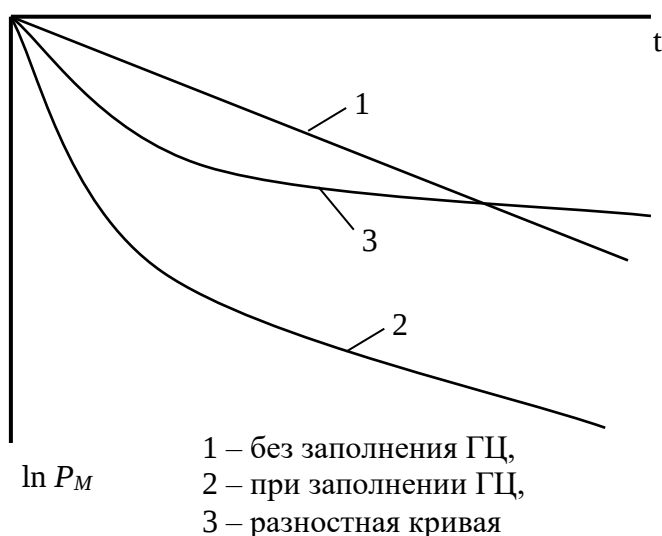


Рис. 2. Функции распределения статистической задержки пробоя по длительности.

Второй этап. Измерение вероятности включения микроплазмы при заполнении глубоких центров в микроплазменном канале. Кривая 2 (см. рис. 2) показывает типичную функцию распределения задержки пробоя при заполнении глубоких центров в полулогарифмических координатах.

Разностная кривая 3, полученная вычитанием кривой 1 из кривой 2, является функцией распределения статистической задержки пробоя микроплазмы, связанной с реэмиссией носителей заряда с глубоких центров. Она содержит всю основную информацию о влиянии глубоких центров на статистическую задержку пробоя p – n -перехода. Анализ функции распределения задержки пробоя микроплазмы по длительности позволяет определить параметры ГЦ: энергию активации, сечение захвата, концентрацию.

Структурная схема установки представлена на рисунке 3.

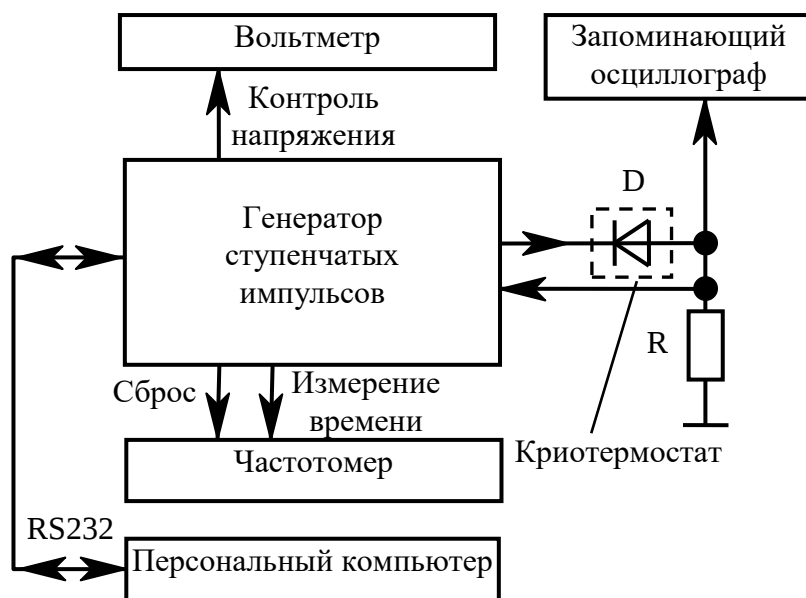


Рис. 3. Структурная схема установки для исследования задержки лавинного пробоя в диодах.

Установка автоматизирована на основе микроконтроллера AT90S2313 фирмы ATMEL [5], связывающего ее с персональным компьютером, посредством которого осуществляется управление установкой и обработка результатов измерений.

Генератор ступенчатых импульсов формирует импульсы формы, указанной на рисунке 16. Он состоит из блока управления на основе микроконтроллера, блока формирования импульсов на полевых транзисторах IRFBE30 фирмы International Rectifier и микросхем-драйверов IR2125 той же фирмы, компаратора напряжения и блока питания. В структурной схеме установки (см. рис. 3) частотомер используется для контроля длительности импульсов t_c , t_n , t_p а также может быть использован для измерения времени

задержки микроплазменного пробоя t_3 , вольтметр – для контроля напряжений V_1 , V_2 , V_3 , V_B , осциллограф – для контроля формы импульсов, подаваемых на исследуемый диод. Диапазон измеряемых задержек от 1 мкс до 7 мин при максимальном напряжении лавинного пробоя 350 В. Исследуемый образец размещается в светонепроницаемом криотермостате, позволяющем проводить измерения в диапазоне температур 77–400 К и поддерживать ее с точностью $\pm 0,1$ К. Внешний вид установки представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Внешний вид установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булярский С. В., Сережкин Ю. Н., Ионычев В. К. Влияние ловушек на запуск лавины при пробое фосфидгаллиевых p - n -переходов // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – Вып. 5. – С. 9–13.
2. Булярский С. В., Сережкин Ю. Н., Ионычев В. К. Определение параметров глубоких уровней по релаксационной задержке пробоя p - n -перехода // ФТП. – 1999. – Т. 33. – Вып. 4. – С. 494–497.
3. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. – Л.: Энергия, 1980. – 152 с.
4. Ионычев В. К., Ребров А. Н. Исследование глубоких центров в микроплазменных каналах кремниевых лавинных эпитаксиальных диодов // ФТП. – 2009. – Т. 43. – Вып. 7. – С. 980–984.
5. Описание микроконтроллера AT90S2313 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmel.ru/Documents/Documents.htm>.

ИОНЫЧЕВ В. К., ШЕСТЕРКИНА А. А., КАДЕРКАЕВ Р. Р., ШВЕЦОВ А. С.

**ЗАДЕРЖКА ПРОБОЯ МИКРОПЛАЗМЫ В $P-N$ -ПЕРЕХОДЕ
ПРИ ЭМИССИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА С ДВУХУРОВНЕВОГО ЦЕНТРА**

Аннотация. Анализируется влияние глубоких центров на статистическую задержку пробоя микроплазмы в $p-n$ -переходе. Проведен численный расчет вероятности включения микроплазмы в случае эмиссии носителей заряда с двухуровневой ловушки. Показаны характерные особенности в распределении статистической задержки пробоя микроплазмы по длительности, когда два близко расположенных уровня принадлежат двум различным зарядовым состояниям одного и того же центра.

Ключевые слова: статистическая задержка пробоя, глубокие центры, включение микроплазмы, эмиссия носителей заряда, зарядовое состояние центра.

IONYCHEV V. K., SHESTERKINA A. A., KADERKAEV R. R., SHVETSOV A. S.

**MICROPLASMA BREAKDOWN DELAY IN $P-N$ JUNCTION
DUE TO CHARGE CARRIERS EMISSION FROM TWO-LEVEL CENTER**

Abstract. The paper provides an analysis of the effect of deep centers on the static delay of microplasma breakdown in $p-n$ junction. The research includes a numerical calculation of the probability of microplasma turn-on if charge carriers emission from the two-level trap takes place. The features of distribution in time of the static delay of microplasma breakdown were defined, when two close-located levels are owned by two different charge states of the same center.

Keywords: static delay of breakdown, deep centers, microplasma turn-on, carriers emission, charge state of center.

Многозарядная ловушка может последовательно испускать несколько электронов либо дырок. Особенности тепловой ионизации глубоких центров возникают в случае, когда два близко расположенных уровня принадлежат двум различным зарядовым состояниям одного и того же центра. Эти особенности возникают из-за того, что концентрация центров в определенных зарядовых состояниях перераспределяется между двумя состояниями в процессе ионизации. Конкретный центр может быть в одном зарядовом состоянии. Электроны и дырки эмитируют с центра последовательно, поэтому могут возникать ситуации, когда эмиссия с одного зарядового состояния ограничивает выброс с другого [2].

Если глубокий центр создает два энергетических уровня в запрещенной зоне, то он может находиться в трех зарядовых состояниях. Изменение числа центров в данном зарядовом состоянии возможно в результате: захвата электрона либо дырки на центр, эмиссии электрона или дырки с центра. Для центра, оказавшегося в области

пространственного заряда (ОПЗ), первые два процесса исключаются. Существенную роль играет один из процессов эмиссии, вследствие которого центр последовательно переходит из первого состояния во второе, а затем в третье. При этом поступательно уменьшается число носителей заряда на центре. Схема таких переходов показана на рисунке 1.

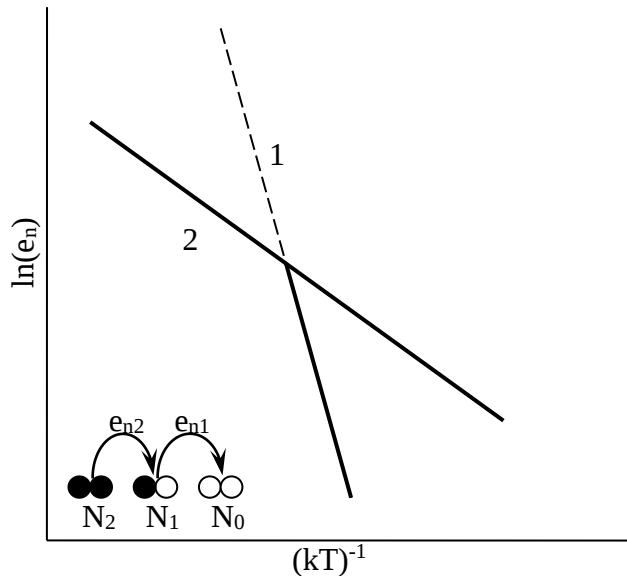


Рис. 1. Схема термических переходов и зависимость скорости эмиссии с двухуровневого центра от температуры. 1 – e_{n1} ; 2 – e_{n2}

Рассмотрим для определенности полупроводник n-типа. В качестве начальных условий выберем полное заполнение центров носителями заряда ($N_{20}=N_t$). Все центры захватили по два электрона. При некоторой температуре, достаточной для перехода электронов с уровней в зону проводимости, концентрация центров в различных зарядовых состояниях будет изменяться. Выброс электрона с уровня, соответствующего состоянию N_2 , в зону проводимости переводит центр в состояние N_1 . Вероятность этого выброса определяется скоростью термической эмиссии e_{n2} . Только после этого возможен выброс электрона из состояния N_1 в зону проводимости, вероятность которого e_{n1} . Следовательно, изменение концентрации центров в состоянии N_2 происходит за счет одного процесса, а в N_1 – за счет двух процессов, что описывается системой кинетических уравнений

$$\frac{dN_2}{dt} = -e_{n2}N_2 ; \quad \frac{dN_1}{dt} = -e_{n1}N_1 + e_{n2}N_2 \quad (1)$$

с начальными условиями $N_2(0)=N_t$, $N_1(0)=0$. При этом в процессе перезарядки центра выполняется условие $N_2(t)+N_1(t)+N_0(t)=N_t$. Решение системы уравнений (1) дает:

$$N_1(t) = \frac{e_{n2}N_t}{e_{n2} - e_{n1}} \left(\exp(-e_{n1}t) - \exp(-e_{n2}t) \right), \quad (2)$$

$$N_2(t) = N_t \exp(-e_{n2}t). \quad (3)$$

Скорости эмиссии электронов из зарядовых состояний N_2 и N_1 будут определяться как

$$G_1(t) = e_{n1}N_1(t), \quad G_2(t) = e_{n2}N_2(t).$$

Для функции распределения задержки пробоя МП по длительности, обусловленной реэмиссией носителей с двухуровневой ловушки, получено следующее выражение [3]:

$$1 - P_{Mt} = \exp \left\{ A \left[\frac{e_{n2}}{e_{n2} - e_{n1}} \exp(-e_{n1}t) + \frac{e_{n2} - 2e_{n1}}{e_{n2} - e_{n1}} \exp(-e_{n2}t) - 2 \right] \right\}, \quad (4)$$

где $A = S_M N_t \int_{L_m}^{L_n} P_n(x) dx$, L_m , L_n – границы области релаксации носителей заряда с глубоких уровней, S_M – площадь микроплазмы; $P_n(x)$ – вероятность запуска лавины носителем заряда.

Для анализа выражение (4) удобно представить в полулогарифмической системе координат в виде

$$\varphi(t) = \ln(1 - P_{Mt}) = \varphi_1(t) + \varphi_2(t), \quad (5)$$

$$\text{где } \varphi_1(t) = A \left[\frac{e_{n2}}{e_{n2} - e_{n1}} \exp(-e_{n1}t) - 1 \right], \quad (6)$$

$$\varphi_2(t) = A \left[\frac{e_{n2} - 2e_{n1}}{e_{n2} - e_{n1}} \exp(-e_{n2}t) - 1 \right]. \quad (7)$$

Физический смысл параметра A состоит в следующем. Величина $\exp(-A)$ есть вероятность того, что по истечении времени, когда установится стационарное состояние ловушки, после подачи прямоугольного импульса перенапряжения, микроплазма не включится. Теоретически это время равно бесконечности.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов функции $\varphi(t)$, $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ при различных соотношениях e_{n1} и e_{n2} . Для удобства расчетов величина A взята равной 1. В определенном диапазоне температур, когда e_{n1} и e_{n2} равны или близки друг другу, разделить два процесса перезарядки двухуровневого центра из функции распределения статистической задержки пробоя не представляется возможным (см. рис. 2а, 2б), тем более, если экспериментальная кривая $\varphi(t)$ не достигает насыщения – величины $2A$. Будет обнаружен только один уровень, но с неверным значением концентрации.

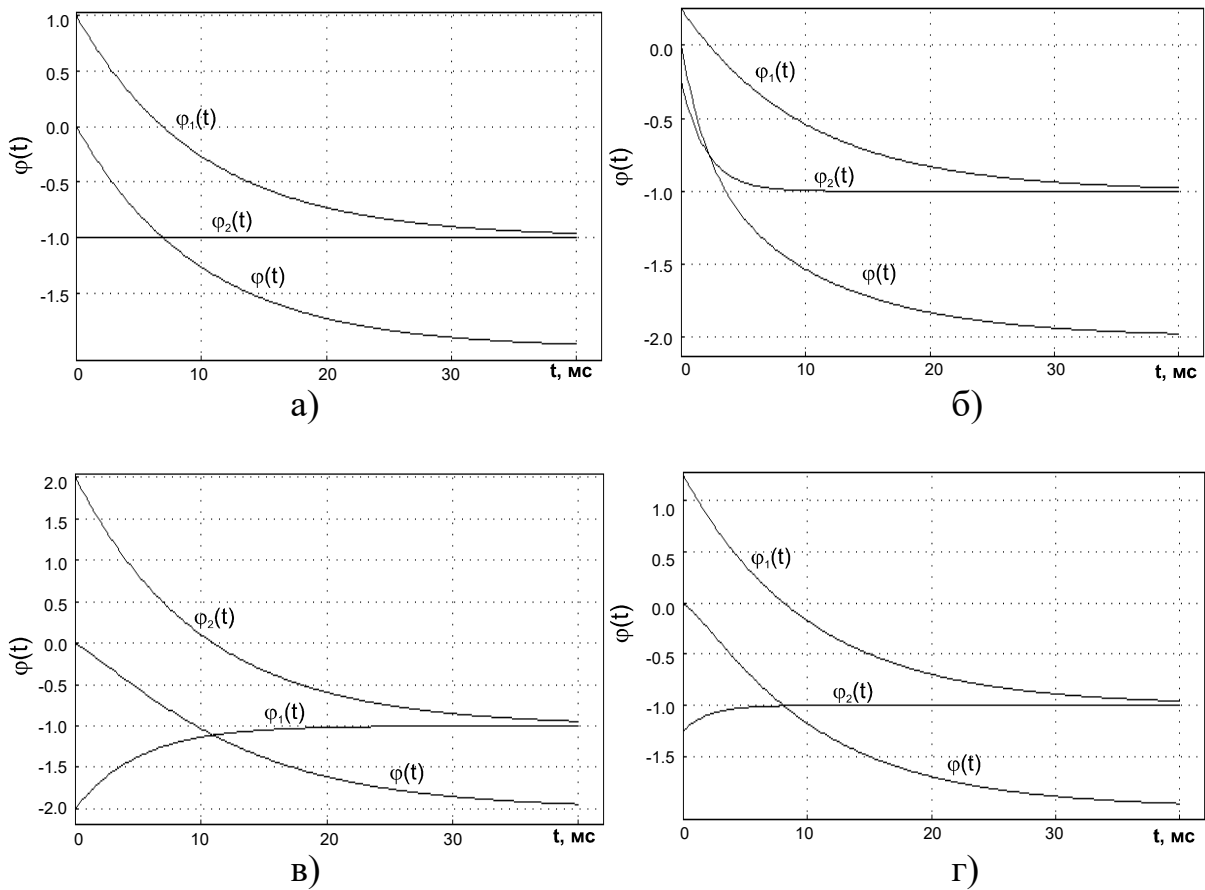


Рис. 2. Функции распределения задержки пробоя микроплазмы при эмиссии электронов с двухуровневой ловушки. $\frac{e_{n1}}{e_{n2}}$: а) – 0,5; б) – 2; в) – 5; г) – 0,2.

Чтобы отдельно определить вероятности ионизации обоих зарядовых состояний, необходимо экспериментально осуществить различные начальные заполнения этих состояний. Если скорости эмиссии с уровней сильно различаются, во всяком случае, более чем в несколько раз, то разделить эти два процесса можно путем аппроксимации кривой $\varphi(t)$ суммой экспонент и констант. В случае $e_{n1} \gg e_{n2}$, выброс электронов с зарядового состояния N_2 сильно лимитирует процесс эмиссии с зарядового состояния N_1 , и функция распределения задержки пробоя $\varphi(t)$ имеет характерный выпуклый начальный участок (см. рис. 2в). Когда e_{n1} превышает e_{n2} более, чем в десятки раз, $\varphi_1 \approx A$, и перезарядка ловушки практически определяется скоростью эмиссии носителей e_{n2} из зарядового состояния N_2 , но с удвоенной концентрацией центров, т.е. с уровня, соответствующего зарядовому состоянию N_1 электроны эмитируют почти мгновенно вслед за электронами из состояния N_2 . При $e_{n2} \gg e_{n1}$, функция распределения $\varphi(t)$ имеет такой же вид (см. рис. 2г), что и в случае эмиссии основных носителей с уровней, принадлежащих двум различным по природе центрам [1; 4]. Разделить эти два уровня большого труда не представляет, а идентифицировать уровни можно лишь по концентрации центров.

В результате проведенной работы получено математическое выражение и проведены расчеты вероятности включения микроплазмы в случае эмиссии носителей заряда с двухуровневой ловушки. Показаны характерные особенности в распределении статистической задержки пробоя микроплазмы по длительности, когда два близко расположенных уровня принадлежат двум различным зарядовым состояниям одного и того же центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булярский С. В., Сережкин Ю. Н., Ионычев В. К. Статистическая задержка пробоя микроплазмы в фосфидгаллиевых p - n -переходах // ФТП. – 1999. – Т. 33. – Вып. 11. – С. 1345–1349.
2. Ионычев В. К. Микроплазменная спектроскопия глубоких уровней в p - n -переходах. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 132 с.
3. Ионычев В. К., Ребров А. Н. Численный расчет вероятности включения микроплазмы в p - n -переходе // Известия вузов. Электроника. – 2006. – № 4. – С. 23–30.
4. Ионычев В. К., Ребров А. Н. Исследование глубоких центров в микроплазменных каналах кремниевых лавинных эпитаксиальных диодов // ФТП. – 2009. – Т. 43. – Вып.7. – С. 980–984.

БОБКОВ А. В.
ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 220 В 50 ГЦ HOMEPLUG AV(AV2)
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье рассматриваются преимущества внедрения технологии передачи данных по электрическим сетям HomePlug AV(AV2). Представляются результаты экспериментов, проведенных для выявления факторов, влияющих на качество передачи данных. Предлагаются меры, которые необходимо принять перед внедрением технологии HomePlug AV(AV2).

Ключевые слова: HomePlug AV(AV2), электрическая сеть 220 В 50 Гц, передача данных, Wi-Fi.

BOBKOV A. V.
INTRODUCTION OF DATA TRANSFER TECHNOLOGY HOMEPLUG AV(AV2)
ON POWER LINE 220 V 50 HZ IN BUILDINGS

Abstract. The article considers the advantages of introduction of the data transfer technology HomePlug AV(AV2) on the power line. A number of tests were done to determine the factors of data transfer quality. The author makes a list of requirements to introducing of the technology HomePlug AV(AV2).

Keywords: HomePlug AV(AV2), power line 220 V 50 Hz, data transfer, Wi-Fi.

Интерес к передаче данных по силовым электрическим сетям не перестает угасать. Востребованными являются линии электропередач (ЛЭП), электрические сети 220 В 50 Гц. Это обусловлено тем, что возросло качество передачи информации за счет новых способов цифровой обработки сигналов, а также снизилась стоимость оборудования для передачи данных по энергосетям [1].

В настоящий момент строятся здания, в которых электрическая сеть 220 В 50 Гц предназначена исключительно для того, чтобы передавать электроэнергию потребителям. Чтобы здание имело доступ в информационную сеть Интернет, провайдерам требуется ставить не только оборудование, но и прокладывать отдельно линию связи для каждой квартиры [2].

В некоторых городах России применяется технология передачи данных по электрической сети 220 В 50 Гц, которая позволяет без дополнительного монтажа и прокладки линии предоставлять клиентам услуги связи. Так как в роли линии связи выступает электрическая проводка 220 В 50 Гц, было решено провести ряд экспериментов для выявления факторов, влияющих на качество передачи данных [2].

При проведении экспериментов использовались адаптеры PL-X32M стандарта HomePlug AV производителя ASUS. Для измерения скорости соединения между адаптерами использовалось программное обеспечение Power Packet 5.0, для измерения скорости интернет-соединения и задержки использовался интернет-сервис www.speedtest.ru.

Первый эксперимент проводился в жилом доме, срок эксплуатации которого около 5 лет. Скорость интернет-соединения, предоставляемая провайдером, составляет 40 Мбит/сек. При этом в ходе эксперимента было выявлено, что в жилом доме используется электрическая проводка, выполненная из меди [2; 3]. В таблице 1 приведены результаты первого эксперимента.

Таблица 1

Результаты первого эксперимента

Номер измерения	Прием, Мбит/с	Передача, Мбит/с	Задержка, мс	Скорость соединения, Мбит/с
1	42,42	41,11	4	165
2	47,73	40,43	1	196
3	43,09	39,56	6	147
4	43,96	40,91	8	147
5	42,54	38,18	6	125
6	40,68	40,49	6	162
7	41,93	40,32	5	153
8	40,65	39,61	7	178

Второй эксперимент проводился в жилом доме, срок эксплуатации которого составляет около 15 лет. Скорость интернет-соединения, предоставляемая провайдером, составляет 50 Мбит/сек. При этом в ходе эксперимента было выяснено, что в жилом доме используется электрическая проводка, выполненная из алюминия [2; 3]. В таблице 2 приведены результаты второго эксперимента.

По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что скорость передачи данных по электрической сети 220 В 50 Гц напрямую зависит от качества линии связи. В обоих экспериментах скорость интернет-соединения – 40 Мбит/с и 50 Мбит/с – была доступна в каждой точке измерения. Скорость соединения между адаптерами в первом и втором экспериментах снижалась примерно до 60%. Причиной этого может быть материал, из которого выполнена электрическая проводка 220 В 50 Гц, а также монтаж, который производился для прокладки электрической сети во время строительства здания [3].

Результаты второго эксперимента

Номер измерения	Прием, Мбит/с	Передача, Мбит/с	Задержка, мс	Скорость соединения, Мбит/с
1	50,42	51,21	5	175
2	49,73	50,33	4	163
3	51,09	49,26	6	135
4	50,36	50,21	5	147
5	49,64	48,38	4	110
6	49,18	50,69	7	126
7	50,33	49,42	4	161
8	51,38	51,19	5	138
9	49,23	51,22	5	133
10	49,15	50,11	7	144

Срок службы электрической проводки из алюминия составляет 15–20 лет, у меди – 20–25 лет. Как было сказано ранее, во втором эксперименте использовалась электрическая проводка, выполненная из алюминия. Со временем у алюминия ухудшаются параметры. Это обусловлено тем, что алюминий плохо устойчив к сгибам, что приводит к деформации и ухудшению сигнала, причем мощность передаваемой электрической энергии тоже снижается. Далее, при ремонте электрической проводки в качестве соединения используют скрутку, которая образует высокое сопротивление из-за недостаточного контакта. В результате при большом количестве подключений потребителей верхние слои проводника обгорают, что приводит к ухудшению контакта и качества передачи [3; 4].

Из экспериментов видно, что в доме, где использовалась медная электрическая проводка, скорость соединения выше, чем у дома, где использовалась алюминиевая электрическая проводка. Медь имеет большую электропроводность, чем алюминий, при этом является более устойчивой к сгибам и различного рода деформациям. Следующим фактором является надежность. При эксплуатации около 5 лет вероятность проведения ремонтных работ электрической проводки, выполненной из меди, крайне мала. Из этого следует, что могут отсутствовать скрутки, которые не обеспечивают достаточного контакта [3; 4].

Для достижения лучших результатов передачи данных по электрической сети 220 В 50 Гц, необходимо начать с линии связи. К примеру, для стандарта семейства Fast Ethernet и выше, было уделено особое внимание кабельной линии связи – витой паре.

Меры, которые необходимо обеспечить перед внедрением технологии передачи данных HomePlug AV(AV2) по электрической сети 220 В 50 Гц:

- 1) разработать линию связи, которая будет предназначена не только для передачи информации с высоким качеством, но и электрической энергии;
- 2) разработать специальные методы монтажа, которые позволят сохранить параметры передачи линии связи на всем участке цепи.

В результате обеспечения мер, влияющих на качество передачи линии связи (электрической проводки 220 В 50 Гц), будут получены следующие преимущества [4]:

- 1) построенное здание будет иметь информационную сеть и доступ в сеть Интернет;
- 2) отсутствие необходимости прокладывать дополнительные линии, кабельные каналы;
- 3) отсутствие необходимости дополнительного монтажа и внесения изменений в интерьер здания;
- 4) надежность, так как срок службы составляет 20–25 лет;
- 5) возможность комбинирования с технологией Wi-Fi позволит подключать мобильные устройства;
- 6) скорость передачи данных для стандарта HomePlug AV – 200 Мбит/с, для HomePlug AV2 – 500 Мбит/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровин В. С., Мариниченко А. А. Модернизация системы передачи данных по ЛЭП на участке «Рузаевка-Арзамас» // Электроника и информационные технологии. – 2009. – № 2 (7). – С. 18–21.
2. Бобков А. В. Применение стандарта HOMEPLUG AV для организации и расширения современных локальных сетей [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2015. – № 20. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/primenenie-standarta-homeplug-av-dlya-organizacii-i-rasshireniya-sovremennyx-lokalnyx-setej>.
3. Сайт «Толковый Электрик» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.elictric-tolk.ru.
4. Официальный сайт HomePlug Alliance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.homeplug.org.

КИРДЯШКИН Н. Н., ИВЕНИН С. В.

**ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ПЛАСТИН КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния параметров шероховатости монокристаллических пластин карбида кремния на эффективность их очистки с помощью химической и мегазвуковой обработки. Показано, что эффективность очистки возрастает с увеличением качества полировки (с уменьшением значений параметров шероховатости).

Ключевые слова: карбид кремния, полировка, химическая очистка, мегазвуковая обработка, шероховатость, эффективность очистки.

KIRDYASHKIN N. N., IVENIN S. V.

**SURFACE ROUGHNESS EFFECTS ON CLEANING EFFICIENCY
OF SILICON CARBIDE WAFERS**

Annotation. The paper presents the study results of the effects of roughness parameters of single crystal silicon carbide wafers on the efficiency of their cleaning by chemical and megasonic processing. It is shown that the cleaning efficiency increases with the increasing of polishing quality, i.e. with the decreasing of roughness parameters.

Keywords: silicon carbide, polishing, chemical cleaning, megasonic processing, roughness, cleaning efficiency.

Очистка поверхности пластин карбида кремния перед проведением таких операций как эпитаксия, окисление, фотолитография заключается в удалении с поверхности остатков от предыдущего технологического процесса (шлифовка, полировка и т. д.). При этом следует различать грубую очистку от остатков абразивного монокристалла, тонкую и сверхтонкую очистку после химико-механической обработки.

При выборе технологического процесса очистки пластин карбида кремния следует исходить из требований по чистоте поверхностей, которые диктует та технологическая операция, на которую поступают пластины.

Чтобы правильно определить технологический процесс очистки пластин карбида кремния, необходимо знать какие загрязнения имеются на поверхности, как они могут повлиять на работу приборов, изготовленных на основе этих пластин, как можно удалить эти загрязнения с поверхности и какими методами можно проконтролировать чистоту поверхности пластин [1].

В общем случае процесс очистки пластин карбида кремния является комплексной и достаточно сложной процедурой, для реализации которой требуется соответствующий комплекс оборудования.

Методы очистки и контроля поверхности пластин. В настоящее время используются следующие методы очистки полупроводниковых пластин.

- Отмывка в растворителях, которую применяют для удаления с поверхности жиров растительного и животного происхождения и других органических и неорганических загрязнений. При отмывке в растворителях используют горячие и кипящие растворители и их пары.
- Отмывка в кислотах применяется для удаления с поверхности атомов и ионов металлов, а также оксидов, сульфатов, нитратов и других соединений, растворимых в них.
- Отмывка в щелочах используется для удаления жирных и некоторых других трудноудаляемых загрязнений (графит и полимерные пасты).

После отмывки в кислотах, щелочах или других растворителях на поверхности пластин остается некоторое количество загрязненного моющего раствора, который удаляют отмывкой в деионизированной воде в различных вариантах.

Вариант 1. Отмывка в многокаскадных ваннах, где пластины переносятся из одной ванны в другую в направлении, противоположном движению воды.

Вариант 2. Струйная промывка струей жидкости, направленной под давлением на очищенную поверхность.

Вариант 3. Гидромеханическая отмывка, которая обеспечивает удаление загрязнений с поверхности пластин проточной водой и мягкими вращающимися щетками и кистями.

Вариант 4. Отмывка в ультразвуковых ваннах значительно повышает эффективность обезжиривания, травления и очистки пластин в моющих растворах и воде.

Вариант 5. Мегазвуковая обработка значительно повышает эффективность очистки за счет того, что уменьшается граничная толщина акустического слоя до микрон и менее [2].

Для контроля качества очищенных пластин используются следующие группы методов.

1. Микроскопические методы анализа частиц на поверхности пластин, включая электронную и оптическую микроскопию [3].

2. Методы анализа органических загрязнений основанные на смачивании поверхности пластин жидкостями, включая методы погружения, пульверизации, конденсации воды [3].

3. Методы исследования рельефа поверхности пластины с помощью профилометра или сканирующего зондового микроскопа, например, атомного силового микроскопа, который исследует свойства поверхности на атомном уровне [4].

Эксперимент. В качестве объекта исследования влияния шероховатости на эффективность очистки были взяты 2 пластины 4H-SiC диаметром 76,26 мм, полированные с двух сторон. Исследовалась плоскость (0001). Предыстория пластин такова, что они после полировки длительное время хранились в негерметичной таре.

Эксперимент проводился в следующей последовательности:

- контроль качества поверхности пластин до финишной очистки;
- химическая обработка с использованием различных растворителей;
- отмывка в потоке деионизированной воды;
- контроль качества поверхности после химической обработки;
- мегазвуковая обработка в различных средах;
- контроль качества поверхности пластин.

Контроль качества поверхности осуществляется с помощью оптического микроскопа, путем визуального осмотра и подсчета количества загрязнений, а параметры шероховатости поверхности определялись на стилусном профилометре [5].

Подсчет количества загрязнений и измерение шероховатости на рабочей стороне образцов проводился на пяти участках по схеме, показанной на рисунке 1.

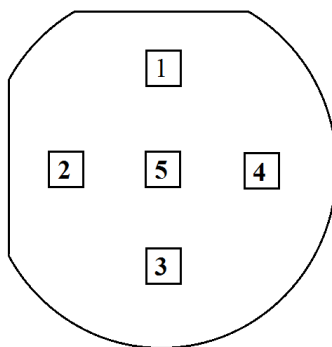


Рис 1. Схема расположения областей для подсчета количества загрязнений и измерения шероховатости.

Результаты контроля качества поверхности пластин до очистки по схеме рисунка 1 представлены на рисунках 2–4.

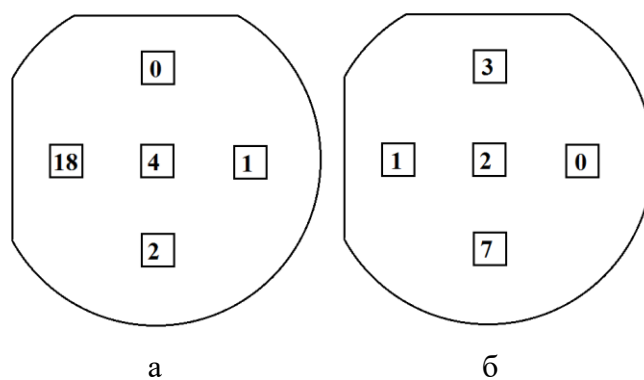


Рис. 2. Количество загрязнений пластин SiC до очистки (цифры – количество загрязнений в тестовых областях): а – первая пластина, б – вторая пластина.

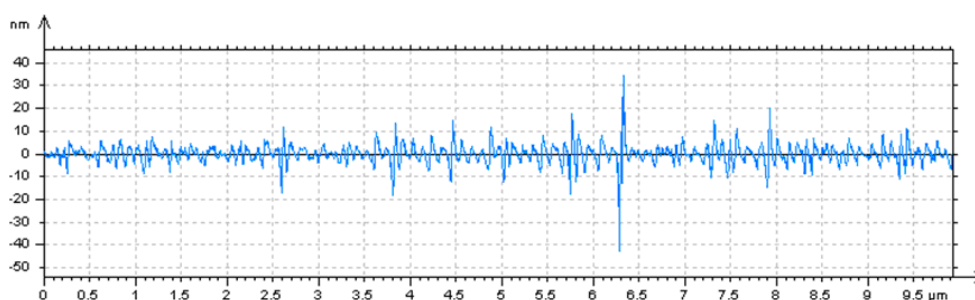


ISO 4287		
Amplitude parameters - Roux		
Rp	0.598	nm
Rv	0.568	nm
Rz	1.17	nm
Rc	0.475	nm
Rt	1.17	nm
Ra	0.0789	nm
Rq	0.124	nm
Rsk	-0.038	
Rku	6.75	
Material Ratio parameters - F		
Rmr	100	%
Rdc	0.121	nm

а

б

Рис 3. а – двумерный профиль первой пластины SiC до очистки, б – результаты измерения шероховатости в центре пластины.



ISO 4287		
Amplitude parameters - Roux		
Rp	30.9	nm
Rv	42.9	nm
Rz	73.8	nm
Rc	13.2	nm
Rt	73.8	nm
Ra	2.98	nm
Rq	4.42	nm
Rsk	-0.633	
Rku	15.5	
Material Ratio parameters - I		
Rmr	100	%
Rdc	5.30	nm

а

б

Рис 4. а – двумерный профиль второй пластины SiC до очистки, б – результаты измерения шероховатости в центре второй пластины.

Параметры шероховатости представлены в таблице 1 согласно [6]:

Ra – среднеарифметическое отклонение величины выступов и впадин;

Rq – среднеквадратичное отклонение профиля шероховатости от средней линии;

Rp – максимальная высота пика профиля;

Rv – максимальная глубина профиля.

Измерение шероховатости на периферийных областях первой и второй пластины дало результаты не сильно отличающиеся от измерений в центре пластин. Из полученных данных видно, что общее количество загрязнений на первой пластине почти в два раза больше, чем на второй (25 и 13). В то же время параметры шероховатости (Ra, Rq, Rp, Rv) на первой пластине существенно меньше (см. таблицу 1 и рис. 2).

Затем обе пластины были последовательно обработаны в перекисно-аммиачном и перекисно-соляном растворах (75 °С, 5 мин в каждом растворе). Далее они отмывались в потоке деионизированной воды. После сушки определялось количество загрязнений и шероховатость на пяти участках.

Таблица 1

Параметры шероховатости

Образец	Тестовые области	Ra, нм	Rq, нм	Rp, нм	Rv, нм
№1	1	0,10	0,15	0,62	0,52
	2	0,07	0,12	0,60	0,53
	3	0,08	0,11	0,58	0,57
	4	0,07	0,13	0,56	0,50
	5	0,08	0,12	0,59	0,56
№2	1	2,95	4,40	31,1	44,0
	2	3,24	4,10	29,9	40,9
	3	3,15	5,20	30,0	41,8
	4	3,3	4,50	30,5	42,7
	5	2,98	4,42	30,9	42,9

Заключительный этап обработки включал следующие процедуры.

- 1) Мегазвуковая очистка пульсирующей струей воды в течение 40 с, число оборотов центрифуги 200 об / мин, частоты 1 МГц.
- 2) Сушка ИК-лампой в потоке азота, время процесса 40 с, число оборотов центрифуги – 1 000 об / мин и контроль качества пластин по ранее описанной методике.

Из результатов измерений, приведенных в таблице 1, видно, что параметры шероховатости первой пластины почти в 40 раз меньше, чем у второй пластины, а количество загрязнений на начальном этапе очистки почти в два раза больше.

Результаты всех обработок и контроля представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты всех обработок и контроля

Контроль параметров	Параметры шероховатости пластины (в центре) Ra, Rq, Rp, Rv, нм		Количество дефектов на пластине	
	первая	вторая	первая	вторая
Виды обработки	0,08	2,98	25	13
	0,12	4,42		
	0,59	30,9		
	0,56	42,9		
после химической обработки	0,07	2,54	10	7
	0,12	3,59		
	0,7	15,1		
	0,56	18,3		
после мегазвуковой обработки	0,08	1,89	3	4
	0,13	2,49		
	0,57	11,0		
	0,53	10,4		

В результате всех обработок (и химической, и мегазвуковой), одинаковых для обеих пластин, число загрязнений на первой пластине уменьшилось более, чем в 8 раз, а на второй – более, чем в 3 раза. В то же время параметры шероховатости на первой пластине практически не изменились, а на второй пластине параметры Ra, Rq, Rp, Rv уменьшились почти на 40%.

Таким образом, пластины с высоким качеством полировки ($Ra < 0,1$ нм) более эффективно очищаются в процессе финишной обработки монокристаллических пластин карбида кремния по сравнению с пластинами, шероховатость которых превышает 1–2 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Запорожский В. П., Лапшинов В. А. Обработка полупроводниковых материалов. – М.: Высш. шк., 1988. – 184 с.
2. Карбань В. И., Кой П., Рогов В. В., Хофман Х. Обработка полупроводниковых материалов / Под ред. Н. В. Новикова, В. Бертольди. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.
3. Бутурлин А. И., Голубская И. Э., Чистяков Ю. Д. Методы исследования и контроль чистоты поверхности. – М.: МИЭТ, 1989. – 315 с.
4. Емельянов В. А., Базанов В. В. Методы контроля параметров твердотельных структур СБИС. – Минск: Изд-во Бестпринт, 1992. – 58 с.
5. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с.
6. ISO 4287:1997 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.iso.org/iso/ru/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=10132.

НОВИКОВ Д. П.

**О ВЛИЯНИИ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ПРЯМОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
НА ТЕМПЕРАТУРУ ИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ**

Аннотация. В статье представлены результаты измерения параметров прямой вольт-амперной характеристики у серии из 50 IGBT транзисторов одного наименования. Приведены гистограммы разброса параметров по образцам при 20 °C и 100 °C. На основании математических расчетов спрогнозирована температура полупроводниковой структуры каждого транзистора из серии и сделаны выводы о влиянии разброса параметров на температуру.

Ключевые слова: силовой транзистор, вольт-амперная характеристика, разброс параметров, температура, мощность потерь, гистограмма распределения.

NOVIKOV D. P.

**ON THE EFFECT OF PARAMETER SPREAD OF DIRECT CURRENT-VOLTAGE
CHARACTERISTIC OF POWER TRANSISTORS
ON TEMPERATURE OF SEMICONDUCTOR STRUCTURE**

Abstract. The article presents the measurement results of the parameters of the direct current-voltage characteristics in a series of 50 IGBT transistors of the same name. The histograms of parameter spread on samples at 20 °C and 100 °C are included. By means of mathematical calculations the temperature of the semiconductor structure of each transistor of the series was predicted. The conclusions about the effect of the parameter spread on the semiconductor temperature were made.

Keywords: power transistor, current-voltage characteristic, parameter spread, temperature, power loss, distribution histogram.

Любая, даже самая совершенная технология не обеспечивает полной идентичности характеристик изделий. В некоторых случаях нет необходимости в такой идентичности. Но по ряду изделий, к числу которых относятся силовые транзисторы, значительный разброс параметров может привести к существенному снижению их надежных показателей. Так, принято считать, что повышение температуры полупроводниковой структуры силовых приборов на каждые двадцать градусов снижает их надежность в два раза [1]. Поэтому при комплектовании транзисторных модулей преобразователей электрической энергии необходимо стремиться к обеспечению примерно равного теплового режима для всех транзисторов.

Критическим параметром транзисторов является предельно допустимая температура их полупроводникового элемента. Для большинства современных IGBT транзисторов она составляет 150 °С. Она зависит от параметров U_0 , R_d прямой вольт-амперной характеристики (ПВАХ) транзистора, величины тока нагрузки, теплового сопротивления прибора и температуры охладителя, на котором установлен транзистор. Эта зависимость записывается следующим образом:

$$T_{pn} = T_K + P \cdot R_T, (1)$$

где T_{pn} – температура структуры, °С; T_K – температура корпуса, °С; P – мощность потерь в транзисторе, Вт; R_T – тепловое сопротивление транзистора, °С/Вт.

Мощность потерь в транзисторе зависит от среднего значения протекающего тока и параметров его ПВАХ:

$$P = U_0 \cdot I + I^2 \cdot R_d (2).$$

Иногда пользуются формулой:

$$P = I \cdot \Delta U, (3)$$

где $\Delta U = U_0 + I \cdot R_d$.

Для того, чтобы выяснить, насколько может быть велик разброс температур транзисторов одной партии в зависимости от различия их ПВАХ был проведен эксперимент на партии из 50 IGBT транзисторов IRG4PH50 производства International Rectifier с номинальным напряжением 1200 В и током 45 А. Для каждого транзистора снимались вольт-амперные характеристики при 20 °С и 100 °С, напряжении $U_{зз} = 14$ В. Данные обрабатывались с использованием математических программ [2].

Характерный вид этих зависимостей для одного транзистора отображен на рис. 1а. На рис. 1б показана аппроксимированная методом наименьших квадратов линейная ПВАХ для оценки величин U_0 и R_d .

Из рисунков следует, что характеристики при 20 °С и 100 °С заметно отличаются. Видна точка инверсии, где температурный коэффициент напряжения меняет знак с отрицательного на положительный.

На рис.2 приведены гистограммы распределений измеренных параметров U_0 и R_d , ΔU и температурного коэффициента напряжения (ТКН). Из этих гистограмм следует, что их огибающая при увеличении количества измерений должна приближаться к функции нормального закона Гаусса.

В табл. 1 приведены приближенные количественные параметры этих функций: математическое ожидание и дисперсия. Эти данные сами по себе еще не характеризуют

степень нагрева транзисторов. Для получения ответа необходимо в соответствии с выражением (1) знать мощность потерь в транзисторе при протекании заданного тока и тепловое сопротивление каждого транзистора [3].

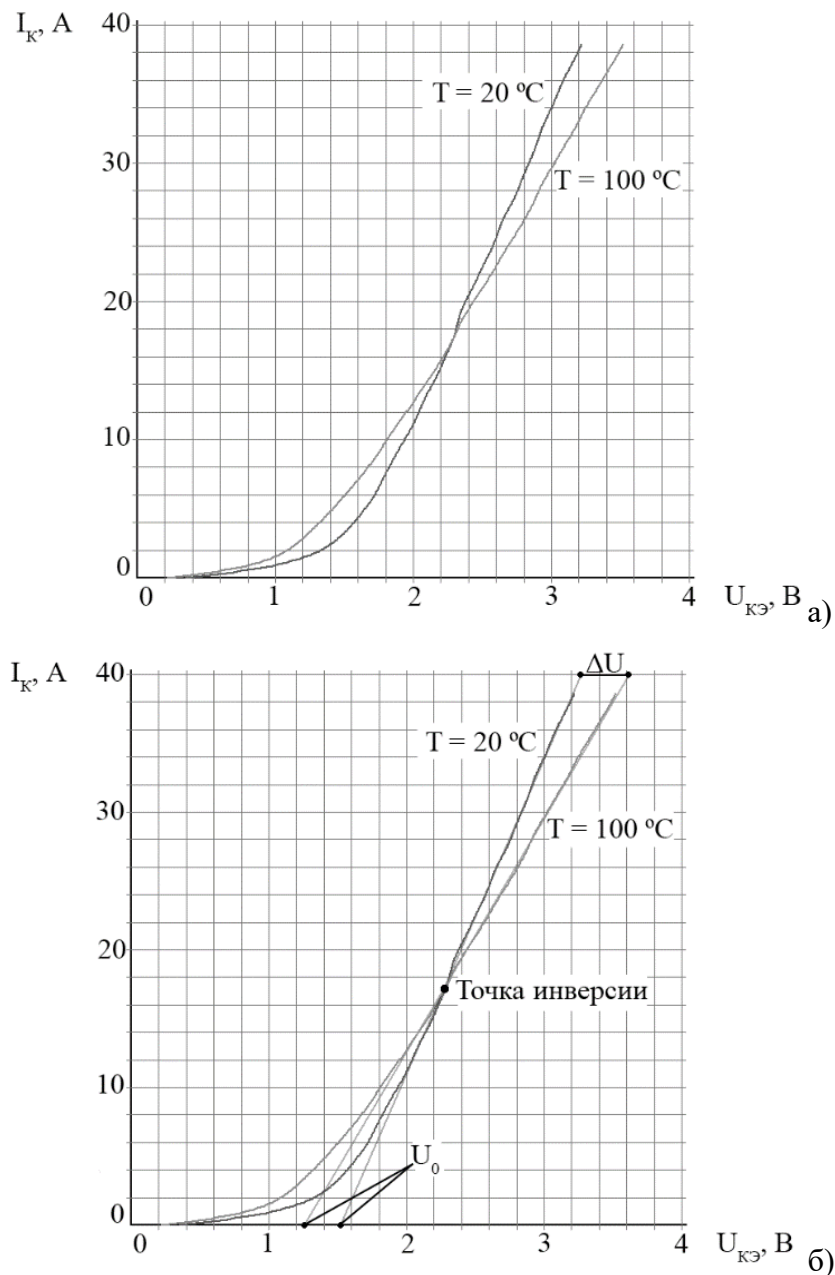


Рис. 1. Выходные вольт-амперные характеристики транзисторов IRG4PH50 (а) и построения для определения параметров (б).

Мощность потерь при токе $I_K = 30\text{ А}$ была оценена по выражению (2), а среднее значение теплового сопротивления для данных транзисторов, полученное из справочных материалов, составляет:

$$R_{th\max} = 0,64 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

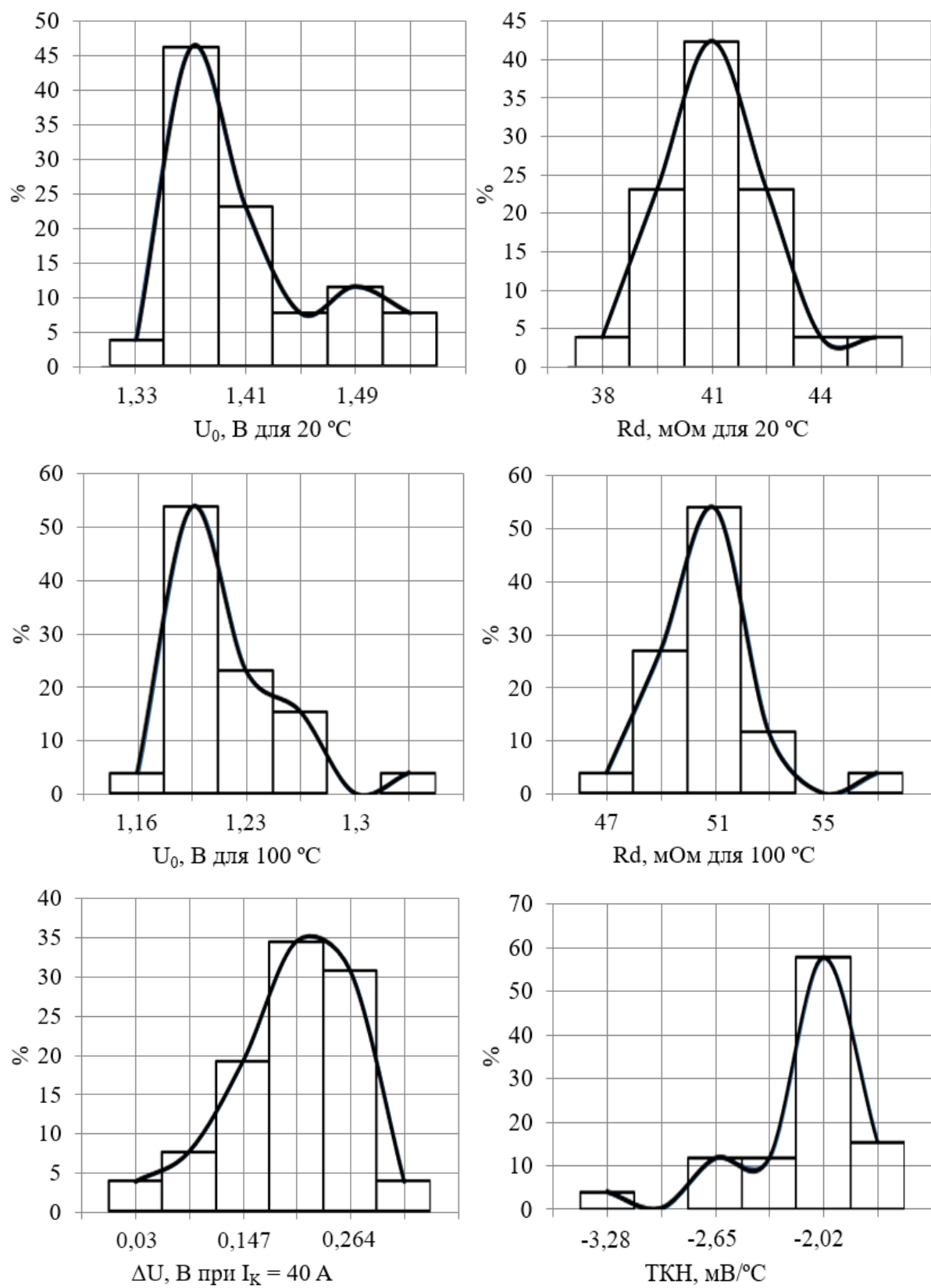


Рис. 2. Гистограммы распределений параметров транзисторов, измеренных по вольт-амперным характеристикам, и их огибающие.

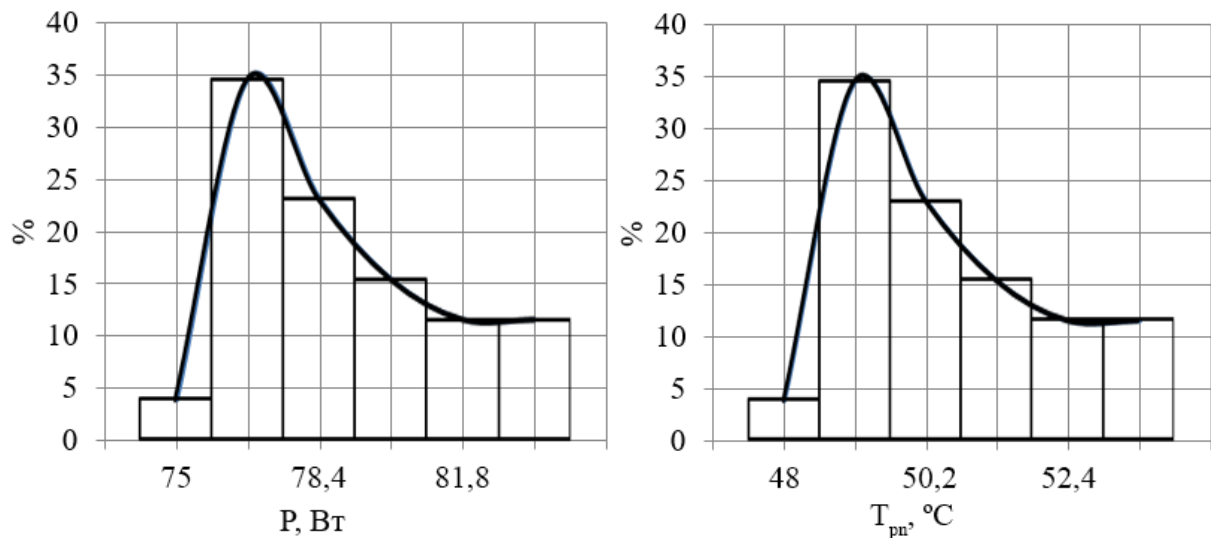
Таблица 1

Параметр	U_0 20 °C	R_d 20 °C	U_0 100 °C	R_d 100 °C	ΔU	ТКН
$M[X]$	1,406	41,5	1,216	50,5	0,202	-2,1
$D[X]$	0,0023	0,00188	0,001	0,0031	0,0045	$1,2 \cdot 10^{-4}$

На рис. 3 приведены расчетные гистограммы для мощности потерь и температуры перегрева полупроводниковой структуры относительно температуры охладителя. Математические ожидания этих величин и дисперсии соответственно равны:

$$M[X] = 78,87; D[X] = 5,12;$$

$$M[X] = 50,48; D[X] = 2,1.$$

Рис. 3. Гистограммы распределений P и T_{jn} транзисторов и их огибающие.

Можно предположить, что при наличии информации о величине R_{th} каждого транзистора параметры гистограммы для T_{jn} могут изменяться в сторону увеличения дисперсии.

Выводы.

Полученные результаты позволяют сделать выводы не только по степени стабильности технологического процесса изготовления транзисторов, но и по отбору транзисторов для комплектования преобразовательных устройств [4], в том числе и при их групповом соединении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колпаков А. И. Методы оценки надежности силовых модулей IGBT SEMIKRON в предельных режимах // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 40–45.
2. Егоров Н. М., Глинченко А. С., Комаров В. А., Сарафанов А. В. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 361 с.
3. Колпаков А. И. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 1 // Силовая электроника. – 2012. – № 3. – С. 72–78.
4. Бардин В. М., Новиков Д. П. Основные направления работ в области надежности силовых полупроводниковых приборов // Практическая силовая электроника. – 2015. – № 2 (58). – С. 53–55.

ШИШОВ О. В., СЛУГИН А.Г., ЖУКОВ С. А.
КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ В ДИСЦИПЛИНАХ
ПРОФИЛЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

Аннотация. Рассматриваются принципы построения учебного стенда для комплексного изучения функциональных возможностей современных преобразователей частоты вращения двигателей, программируемых логических контроллеров и операторных панелей в системах промышленной автоматизации. Стенд создавался на базе оборудования российской компании «ОВЕН».

Ключевые слова: промышленная автоматизация, контроллер, преобразователь частоты, операторная панель, цифровые промышленные сети.

SHISHOV O. V., SLUGIN A. G., ZHUKOV S. A.
COMPLEX STUDYING OF BASIC ELEMENTS OF AUTOMATION
IN THE COURSES DESIGNED FOR STUDENTS OF INDUSTRIAL ELECTRONICS

Abstract. The article considers the principles of a training bench construction for complex studying of the functionality of rate-of-turn transducers of motors, programmable logic controllers and operator panels in industrial automation systems. The designed training bench is based on the equipment of the Russian company OWEN.

Keywords: industrial automation, controller, frequency inverter, operator panel, digital industrial network.

Лаборатория «Современные технологии промышленной автоматизации» функционирует на кафедре электроники и нанoeлектроники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева уже несколько лет. В ней проводятся учебные занятия, в рамках которых изучаются современные подходы к построению промышленных систем автоматизации. В первую очередь учащиеся знакомятся с базовыми компонентами современной автоматизации – свободно программируемыми контроллерами и операторными панелями, с их аппаратными ресурсами, с возможностями их конфигурирования и программирования. Для расширения учебных возможностей лаборатории перед ее сотрудниками была поставлена задача разработки стенда для изучения преобразователей частоты вращения двигателей (ПЧВ).

Кафедра электроники и нанoeлектроники уже много лет сотрудничает с компанией ОВЕН, являющейся одним из ведущих производителей элементов систем промышленной

автоматизации на отечественном рынке, поэтому при построении стенда применялось оборудование, выпускаемое этой компанией.

Современные ПЧВ – это сложные электронные устройства, которые в своем составе кроме силовой части имеют «интеллектуальные» блоки, позволяющие встраивать преобразователи в общую систему управления технологическим процессом. С точки зрения системного интегратора, определяющего состав системы управления и решающего вопросы распределения стоящих перед ней «интеллектуальных» задач между компонентами системы, ПЧВ фактически представляет собой специализированный контроллер, который должен управлять двигателем в соответствии с сигналами различных дискретных и аналоговых датчиков, сигналов, поступающих от других компонентов системы управления, в том числе по сети. Исходя из этого очевидно, что в учебном процессе нужно было ставить не только вопросы изучения ПЧВ, как отдельного компонента системы автоматизации, а еще и вопросы его включения в общую структуру системы управления, взаимодействия с другими ее компонентами.

В итоге состав оборудования стенда включает набор устройств, образующих некоторый функционально законченный с практической точки зрения комплекс средств. Это позволяет знакомиться как с отдельными компонентами систем автоматики, так и изучать вопросы их совместного использования в конфигурациях, типичных для большинства практических задач.

В соответствии с задачами, ставящимися перед создаваемым стендом, в его состав были включены следующие базовые компоненты:

- 1) преобразователь частоты вращения двигателя (ПЧВ) ОВЕН ПЧВ2;
- 2) программируемый логический контроллер (ПЛК) ОВЕН ПЛК150;
- 3) операторная панель ОВЕН ИП320;
- 4) трехфазный асинхронный двигатель.

Кроме силовой части, ОВЕН ПЧВ2 как компонент систем автоматизации имеет встроенную систему управления с пятью цифровыми, двумя аналоговыми входами, один аналоговый и один релейный выход. Контроллер ОВЕН ПЛК150 имеет шесть дискретных, четыре аналоговых входа, четыре дискретных и четыре аналоговых выхода. ПЧВ, контроллер и операторная панель имеют интерфейсы цифровой сети. В состав стенда необходимо было включить элементы, позволяющие задавать различные сигналы на управляющих входах базовых компонентов, наблюдать значения выходных сигналов, передавать сигналы с одного компонента на другой. Так для подачи на дискретные входы напряжений, соответствующих логическим сигналам, используются тумблеры; для формирования входных аналоговых сигналов – источники напряжения и делители;

интерфейсы цифровых сетей у различных устройств могут коммутироваться с помощью проводных линий с соответствующими разъемами.

В результате была разработана структурная схема учебного стенда, представленная на рисунке 1.

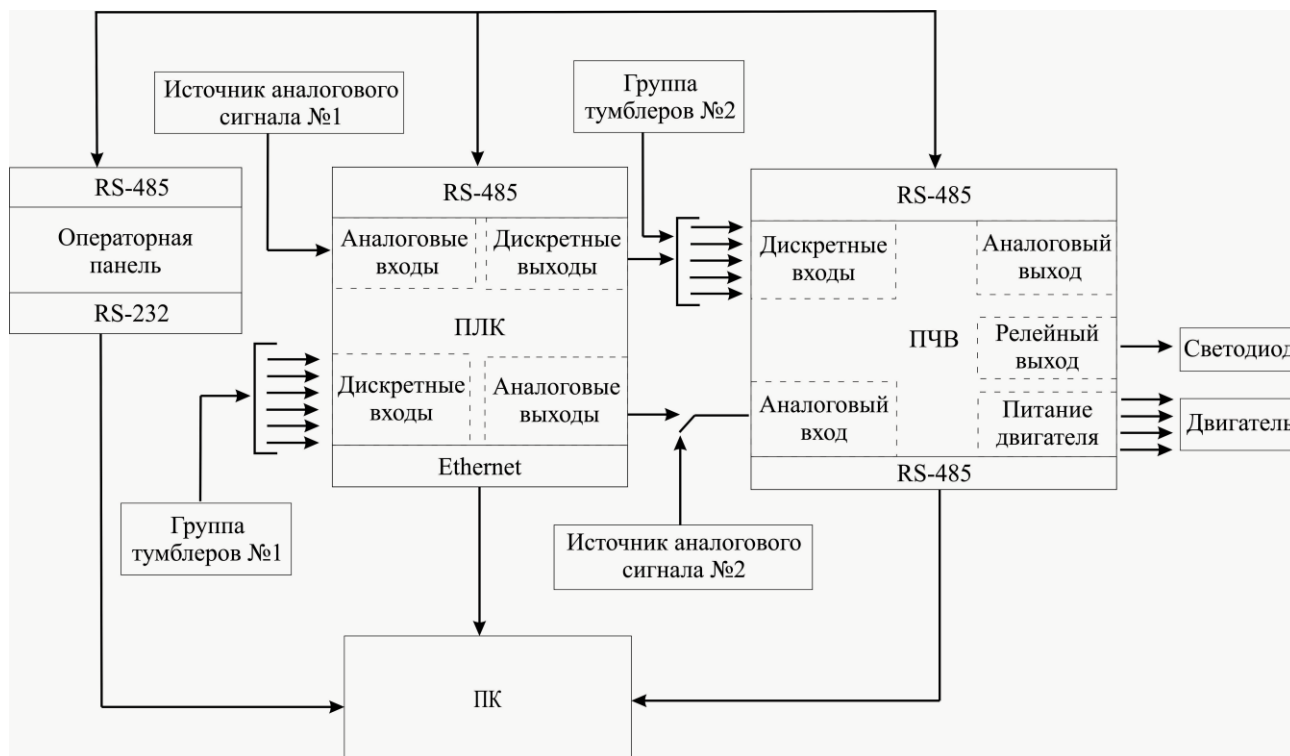


Рис. 1. Структурная схема учебного стенда для изучения ПЧВ.

При работе на стенде перед учащимися могут ставиться следующие задачи.

1. **Изучение ПЧВ.** Стенд позволяет изучать ПЧВ как самостоятельное устройство. Управление ПЧВ осуществляется с помощью дискретных и аналоговых входов. Состояния дискретных входов устанавливаются с помощью группы тумблеров № 2. Они могут использоваться для управления пуском двигателя, реверсом, задания фиксированных скоростей его вращения. Формирование аналогового управляющего сигнала производится источником аналогового сигнала № 2, подключенного к аналоговому входу ПЧВ. Аналоговый вход может быть использован для задания частоты вращения двигателя и запуска преобразователя с помощью входного сигнала по достижении им определенного значения. Конфигурирование и программирование ПЧВ осуществляется или с использованием его локальной операторной панели, или с помощью ПК в программе «Конфигуратор ПЧВ 1, 2» [1].

2. **Изучение ПЛК.** Стенд предоставляет возможность изучать ПЛК как самостоятельный компонент системы автоматики. Формирование дискретных и аналоговых

сигналов на входе ПЛК осуществляется с помощью группы тумблеров № 1 и источника аналогового сигнала № 1. В зависимости от состояния входов, ПЛК выдает необходимые управляющие воздействия на дискретные и аналоговые выходы в соответствии с выполняемой программой. Создание программы управления и ее загрузка в ПЛК осуществляется с помощью ПК в программном пакете CODESYS [1].

3. **Изучение совместной работы ПЛК и операторной панели.** Использование стенда позволяет изучать совместную работу различных компонентов систем автоматизации при обмене данными между ними по сети. Одной из конфигураций, типичной для большинства систем управления, является совместная работа ПЛК и операторной панели. Интерфейсы RS-485 у ПЛК и операторной панели выведены на разъемы. Коммутация ПЛК и операторной панели производится с помощью кабеля. Конфигурирование операторной панели осуществляется с помощью ПК в программе «Конфигуратор ИП 320» [1].

4. **Изучение совместной работы ПЛК и ПЧВ.** ПЛК в соответствии с работой, записанной в него программы, по сигналам на своих дискретных и аналоговых входах может формировать сигналы на дискретных и аналоговых выходах, которые могут подаваться соответственно на дискретные и аналоговые входы ПЧВ, управляя его работой.

5. **Изучение совместной работы ПЧВ и операторной панели.** Включение в сеть операторной панели и ПЧВ позволяет осуществить удаленное управление ПЧВ с панели и отображение на ней параметров его работы. Интерфейсы RS-485 у ПЧВ и операторной панели выведены на разъемы. Коммутация ПЧВ и операторной панели производится с помощью кабеля. Конфигурирование операторной панели и ПЧВ осуществляется с помощью соответствующего программного обеспечения, установленного на ПК.

6. **Изучение совместной работы ПЧВ, ПЛК и операторной панели.** Стенд позволяет объединить все программируемые компоненты стенда по сети и изучать возможности их совместной работы. Характеристики стенда представлены в таблице 1.

Исходя из состава базовых компонентов стенда и элементов, необходимых для управления ими, с учетом общих эргономических требований была разработана лицевая панель, представленная на рисунке 2.

Конструктивные характеристики учебного стенда

№ п/п	Параметр	Значение
1	Конструктивное исполнение	настольное
2	Диапазон температур	от 0 °С до +35 °С при влажности не более 90 %
3	Размеры металлического корпуса	не более 540 × 340 × 120 мм
4	Габаритные размеры стенда	не более 540 × 340 × 280 мм
5	Масса	не более 6,9 кг
6	Напряжение питания	220 В ± 22 В
7	Полная мощность	195 Вт

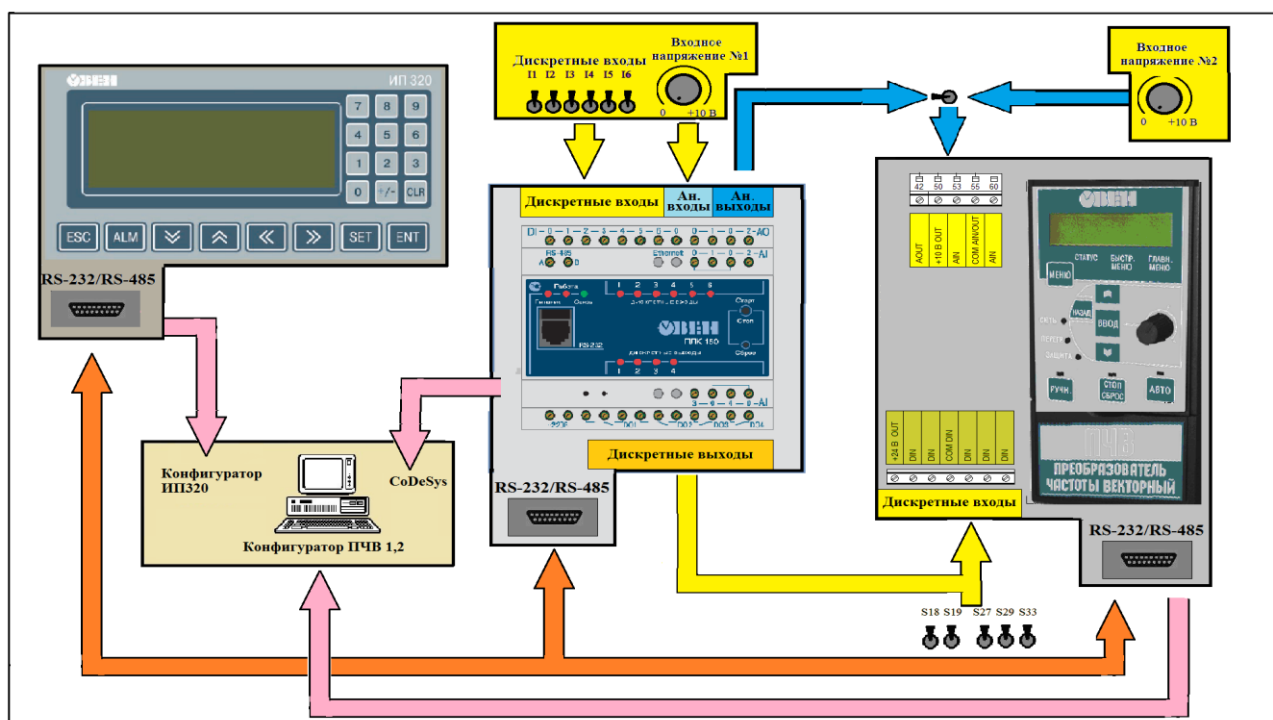


Рис. 2. Лицевая панель учебного стенда.

Стенд комплектуется ПЧВ2-101-K18A (мощностью 180 Вт с однофазным питанием от сети переменного тока 220 В ± 10%), ОВЕН ПЛК150-220.У.М, операторной панелью ОВЕН ИП320. Двигатель в комплекте со стендом монтируется на общую металлическую подложку.

Применение данного учебного стенда, позволяет расширить спектр лабораторных работ [2–7] по таким дисциплинам как «Компьютерные технологии в промышленной автоматизации», «Элементы систем автоматики», «Автоматизация технологических процессов», читаемых по различным техническим направлениям образования в институте электроники и светотехники Мордовского государственного университета. Разработанный стенд может использоваться не только в учебных целях, но и для отладки программного обеспечения при разработке реальных проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сервисное ПО – Конфигураторы для приборов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.owen.ru/soft/64572221>.
2. Шишов О. В. Технические средства автоматизации и управления: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 397 с.
3. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации: учебник. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 468 с.
4. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 365 с.
5. Шишов О. В. Современные технологии промышленной автоматизации: учеб. пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. – 276 с.
6. Шишов О. В. Преобразователи частоты в системах автоматизации технологических процессов: лабораторный практикум. – Саранск: Издатель ИП Афанасьев В. С., 2013. – 116 с.
7. Шишов О. В. Программирование релейных контроллеров: лабораторный практикум. – Саранск: Издатель ИП Афанасьев В. С., 2013. – 148 с.
8. Шишов О. В. Конфигурирование, программирование и работа в сети базовых компонентов систем промышленной автоматизации. – Саранск: Издатель ИП Афанасьев В. С., 2014. – 160 с.

ГАЛИЧ С. В., ДЕОГЕНОВ М. С., ПАСЮК А. О., СЕМЕНОВ Е. С.
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КОММЕРЧЕСКИХ ПКС-КОНТРОЛЛЕРОВ
НА ОСНОВЕ OPENDAYLIGHT

Аннотация. Дается краткое описание архитектур и спецификаций коммерческих ПКС-контроллеров на основе OpenDaylight. Делается вывод о том, что рассматриваемые ПКС-контроллеры готовы к началу внедрения в корпоративные и операторские сети, а также в центры обработки данных.

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть, ПКС-контроллер, коммерческий контроллер, контроллер с открытым исходным кодом, OpenDaylight.

GALICH S. V., DEOGENOV M. S., PASYUK A. O., SEMENOV E. S.
ANALYTICAL REVIEW OF COMMERCIAL
OPENDAYLIGHT-BASED SDN CONTROLLERS

Abstract. The paper gives a brief description of the architectures and specifications of commercial OpenDaylight-based SDN-controllers. It is concluded that OpenDaylight-based controllers are ready for deployment in enterprise, provider and data center networks.

Keywords: software-defined network, SDN-controller, commercial SDN-controller, open-source SDN-controller, OpenDaylight.

За последние несколько лет тема программно-конфигурируемых сетей (ПКС, англ. SDN-Software-Defined Networks) стала одной из наиболее обсуждаемых и популярных на конференциях, форумах, а также в периодических изданиях, освещающих сферу информационных и инфокоммуникационных технологий. Концепция ПКС стала одной из главных тем на международном «Ethernet-форуме», проведенном 6 октября 2015 года в Москве. На данном мероприятии аналитическая группа OSP Data провела опрос представителей 143 компаний. Согласно полученным данным, 72% опрошенных проявляют лишь теоретический интерес к ПКС, при этом 16% респондентов рассматривают возможность применения данной концепции в собственных сетях, а 4% – занимаются тестированием различных ПКС-устройств [1, с. 41].

Согласно результатам опроса «Перспективы внедрения SDN и NFV российскими операторами», проведенного аналитической компанией J'son & Partners Consulting в августе-сентябре 2014 года, большинство респондентов считало, что внедрение технологии ПКС в эксплуатацию на коммерческих сетях начнется в 2016–2017 годах [2].

Данные вышеуказанного опроса хорошо коррелируют с исследованием «SDN, NFV, and open source: the operator's view» компании Gigaom Research от 19 марта 2014 года [3]. В

данном исследовании было опрошено 600 телекоммуникационных провайдеров различного уровня в Северной Америке. Абсолютное большинство респондентов планировали начать внедрение ПКС в течение 2015–2017 годов [3, с. 12]. Кроме того, в данном исследовании интересен тот факт, что 95% опрошенных хотят использовать в своих сетях open-source ПКС-решения, а 76% из них отдают предпочтение open-source продуктам от коммерческих поставщиков [3, с. 24].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что концепция ПКС на данный момент достигла стадии развития, на которой решения от различных поставщиков уже готовы к внедрению в инфокоммуникационные сети. В архитектуре ПКС главным элементом сети, реализующим логику маршрутизации, QoS, фильтрацию нежелательного трафика и прочие функции т.н. control plane, является контроллер. Целью данной статьи является аналитический обзор open-source контроллеров от коммерческих поставщиков. Поскольку одним из наиболее активно поддерживаемых вендорами является open-source ПКС-контроллер OpenDaylight (ODL), мы рассмотрим коммерческие версии данного контроллера. Архитектура ODL проанализирована в [4].

В таблице 1 приведены крупные вендоры, имеющие собственные коммерческие ПКС-контроллеры. Данные взяты из отчета SDx Central [5, с. 4].

Таблица 1

Производители коммерческих ПКС-контроллеров

На основе ODL	Дружественные ODL	Не на основе ODL
Brocade	Cyan (поглощен Ciena)	Big Switch
Cisco	HP	Juniper
Ericsson	NEC	Plexxi
Extreme Networks	Nuage Networks	PLUMgrid
HP		Pluribus
Huawei		Sonus
		VMware NSX

Как видно из таблицы 1, всех производителей ПКС-контроллеров можно условно разделить на три группы:

1. Вендоры, имеющие контроллеры на основе ODL;
2. Производители, активно участвующие в разработке ODL, но имеющие также собственные разработки не на основе данного контроллера, относятся к категории дружественных ODL вендоров;
3. Вендоры, имеющие коммерческие контроллеры не на основе ODL.

При этом интерес вызывает отнесение компаний Juniper и VMware не к дружественным вендорам. Это можно объяснить тем, что в апреле 2015 года обе компании понизили свой статус спонсорства в OpenDaylight Project с платинового и золотого соответственно до серебряного [6]. В случае с компанией Juniper ослабление интереса к ODL связано с разработкой собственного контроллера Juniper Contrail, который впоследствии компания выложила в открытый доступ под названием OpenContrail.

На рисунке 1 изображена федерация различных сетевых доменов, каждый из которых управляется кластером ПКС-контроллеров. В соответствии с рисунком 1 рассмотрим технические спецификации ODL-контроллеров каждого вендора. Критериями сравнения являются: сфера применения контроллера, поддерживаемые интерфейсы на северном и южном интерфейсах, существующие приложения, поддержка режимов кластеризации и федерации доменов, поддерживаемые модели коммутаторов и рекомендуемая конфигурация аппаратной платформы сервера.

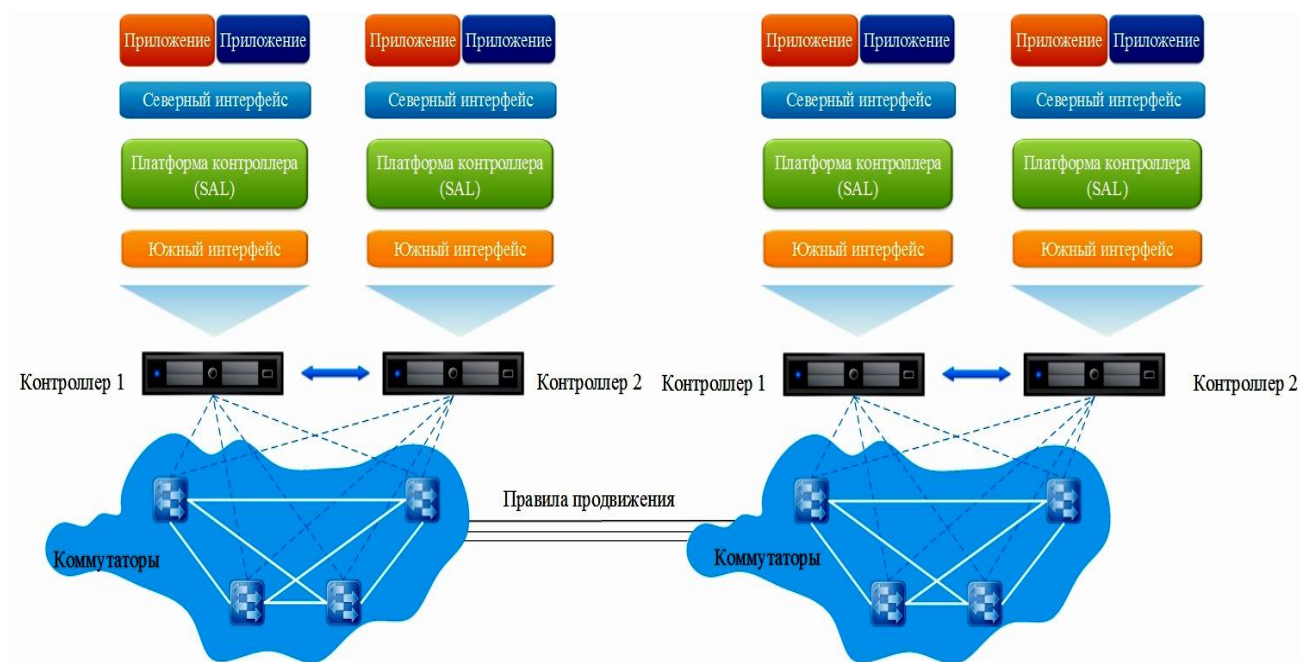


Рис. 1. Объединение различных ПКС-доменов в единую федерацию.

1. Brocade SDN controller

Сфера применения: ЦОД, корпоративные сети, WAN, транспортные сети.

Южный интерфейс: OpenFlow 1.0, OpenFlow 1.3, NETCONF/YANG (RFC6241/6020), BGP-LS, PCEP, OVSDB.

Северный интерфейс: RESTful API, OpenStack Neutron, Python, Ruby.

Фирменные приложения в комплекте поставки: Brocade Topology Manager, Brocade Flow Optimizer.

Приложения сторонних разработчиков: Elbrys SDN School Application for K-12.

Поддержка кластеризации: присутствует.

Поддержка объединения ПКС-доменов в единую федерацию: отсутствует.

Поддерживаемые сетевые устройства: все продукты Brocade и большинство устройств других производителей, поддерживающих указанные протоколы южного интерфейса.

Минимальная конфигурация сервера: центральный процессор Intel Xeon или Intel Core с 4 ядрами, 12 Гб ОЗУ, требуемое место на жестком диске 64 Гб, сеть Gigabit Ethernet [7].

2. Cisco Open SDN Controller

Сфера применения: нет данных.

Южный интерфейс: OpenFlow 1.0, OpenFlow 1.3, NETCONF/YANG (RFC6241/6020), BGP-LS, PCEP, OVSDB.

Северный интерфейс: RESTful API.

Фирменные приложения в комплекте поставки: Cisco OpenFlow Manager, Cisco PCEP Manager, Cisco BGPLS Manager, Cisco Inventory Manager, Model Explorer, Tags Manager.

Приложения сторонних разработчиков: доступны на портале Cisco DevNet.

Поддержка кластеризации: присутствует.

Поддержка объединения ПКС-доменов в единую федерацию: отсутствует.

Поддерживаемые сетевые устройства: Cisco ASR 9000, Cisco Nexus 3000, Cisco Catalyst 4500X и 4500.

Минимальная конфигурация сервера: центральный процессор Intel Xeon или Intel Core с 4 ядрами, 16 Гб ОЗУ, требуемое место на жестком диске 64 Гб [8].

3. Ericsson SDN controller

Сфера применения: ЦОД, корпоративные сети, WAN, транспортные сети.

Южный интерфейс: OpenFlow, OVSDB, BGP, NETCONF, PCEP, BGP-LS.

Северный интерфейс: RESTful API.

Фирменные приложения в комплекте поставки: Сочетание контроллера и фирменного приложения определяет сферу применения решения. Доступны приложения Enhanced Service Control Functionality, Cloud Networking Extensions & applications, Transport Network Control extensions and planning and optimization applications.

Поддержка кластеризации: присутствует.

Поддержка объединения ПКС-доменов в единую федерацию: присутствует, посредством протокола MP-BGP.

Поддерживаемые сетевые устройства: Ericsson Smart Services Router 8000, Ericsson Router 6000, Ericsson SPO, Ciena 6500, любые OpenFlow-коммутаторы, поддерживающие OpenFlow 1.3 OVS.

Минимальная конфигурация сервера: не указана [9].

4. Extreme Networks OneController

Сфера применения: ЦОД, WAN, транспортные сети.

Южный интерфейс: OpenFlow 1.0, OpenFlow 1.3, NETCONF, SNMP, SOAP/XML.

Северный интерфейс: RESTful API, OSGi.

Фирменные приложения в комплекте поставки: отсутствуют.

Приложения сторонних разработчиков: Microsoft Skype for Business, NetSight, VTN coordinator, HyperGlance, FilteredFlowStats, Purview.

Поддержка кластеризации: отсутствует.

Поддержка объединения ПКС-доменов в единую федерацию: отсутствует.

Поддерживаемые сетевые устройства: данные не публикуются, однако данные из технического описания свидетельствуют о поддержке большинства существующих OpenFlow-устройств без привязки к вендору.

Рекомендуемая конфигурация сервера: поставляется в виде модели OneC-A-600 с 2 центральными процессорами Intel Xeon с 24 ядрами, 32 Гб ОЗУ, 2 жесткими дисками по 1 Тб в режиме RAID, 4 портами GigabitEthernet [10].

5. HPE ContexNet

Сфера применения: ЦОД.

Южный интерфейс: OpenFlow 1.3.

Северный интерфейс: RESTful API.

Фирменные приложения в комплекте поставки: ContexMAP, ContexSwitch, ContexControl.

Приложения сторонних разработчиков: большое число приложений, полный список на сайте производителя.

Поддержка кластеризации: присутствует.

Поддержка объединения ПКС-доменов в единую федерацию: присутствует.

Поддерживаемые сетевые устройства: любые сетевые устройства на базе архитектуры x86.

Рекомендуемая конфигурация сервера: блейд-сервер HP BL460 с центральным процессором Intel Xeon E5-2600 v3, v4, до 2 ЦП по 22 ядра, до 2 Тб ОЗУ, либо HP Pro Liant DL380 Intel Xeon E5-2600 v3, v4, до 2 ЦП по 22 ядра, до 3 Тб ОЗУ, сетевые интерфейсы 10GigabitEthernet/40GigabitEthernet [11].

6. Huawei Agile Controller

Сфера применения: ЦОД, корпоративные сети.

Южный интерфейс: OpenFlow, NETCONF, OVSDB.

Северный интерфейс: RESTful API.

Фирменные приложения в комплекте поставки: отсутствуют.

Приложения сторонних разработчиков: Venustech SOC.

Поддержка кластеризации: присутствует.

Поддержка объединения ПКС-доменов в единую федерацию: присутствует, посредством VMware NSX controller, протокол OVSDB.

Поддерживаемые сетевые устройства: Huawei Network Switch, S-серия, AR-серия, CloudEngine-серия, USG серия, а также устройства сторонних производителей.

Рекомендуемая конфигурация сервера: 2 центральных процессора Intel Xeon E5-2620 v3 2,4 ГГц, 6 ядер, 64 Гб ОЗУ, 2 жестких диска по 600 Гб [12].

Заключение. Проведенный обзор спецификаций коммерческих версий ODL показывает, что модульная архитектура OpenDaylight позволяет вендорам оптимизировать контроллеры под конкретную сферу применения. Контроллеры отличаются числом поддерживаемых протоколов южного и северного интерфейсов, а также поддержкой режимов кластеризации и объединения различных ПКС-доменов. Из представленных контроллеров кластеризацию не поддерживает только Extreme Networks OneController, в то время как федерацию доменов возможно реализовать при использовании Ericsson, HPE, Huawei. Таким образом, каждый контроллер занимает свою нишу на рынке, что упрощает выбор контроллера провайдерам различного уровня.

Кроме того, такая высокая активность вендоров по адаптации open-source контроллера ODL под конкретные задачи придает уверенности разработчикам SDN-приложений в том, что их ПО будет востребовано на рынке. Приложения, работающие на открытой версии ODL, с большой долей вероятности будут работать и на коммерческой версии, что снижает риск несовместимости. Программисты, провайдеры и исследователи в сфере ПКС могут начинать лабораторное тестирование различных решений на базе указанных контроллеров. При этом, согласно спецификациям рассмотренных ПКС-решений, сервер, на базе которого предполагается развертывание контроллера, должен иметь многоядерный ЦП Intel Xeon, желательно серии E5.

Также можно отметить тот факт, что поддержка контроллерами большого числа коммутаторов и маршрутизаторов является косвенным индикатором того, что в ближайшее время провайдеры начнут осуществлять эксперименты по внедрению ПКС в свои сети, что подтверждает данные статистики, озвученные в начале данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсков А. SDN: чего хотят заказчики // Журнал сетевых решений LAN. – 2015. – № 10. – С. 41–45.
2. Перспективы внедрения SDN и NFV российскими операторами: результаты опроса [Электронный ресурс] // J'son & Partners Consulting. – 2014. – Режим доступа: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/perspektivy-vnedreniya-sdn-i-nfv-rossiyskimi-operatorami-rezultaty-oprosa.
3. Leary M. SDN, NFV, and open source: the operator's view [Электронный ресурс] // Gigaom Research. – 2014. – Режим доступа: <http://ftt.piaonline.org/Technical%20Committee/CCSC/2014.04.29/>.
4. Галич С. В., Сердюкова И. К., Сафонова О. Е. Обзор архитектуры SDN-контроллера OpenDaylight // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах: сборник докладов и тезисов VI Всероссийской научно-практической конференции, 18 мая 2015 г. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2015. – С. 18–25.
5. SDN Controllers Report 2015 Edition [Электронный ресурс] // SDNCentral, LLC. – 2015. – Режим доступа: <https://www.sdxcentral.com/reports/sdn-controllers-report-2015/>.
6. Matsumoto C. Juniper and VMware Back Off from OpenDaylight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sdxcentral.com/articles/news/juniper-vmware-back-off-from-opendaylight/2015/04/>.
7. Brocade SDN Controller data sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brocade.com/en/products-services/software-networking/sdn-controllers-applications/sdn-controller.html>.
8. Cisco Open SDN Controller 1.2 data sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/cloud-systems-management/open-sdn-controller/datasheet-c78-733458.html>.
9. Ericsson SDN Controller [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sdxcentral.com/reports/sdn-controllers-2015/categories/commercial/ericsson-sdn-controller/>.
10. SDN OneController Installation and User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://documentation.extremenetworks.com/onec_install/SDN_OneController_Installation_and_User_Guide/.
11. HPE ContexNet Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://h20195.www2.hp.com/v2/GetDocument.aspx?docname=4AA6-2633ENW>.
12. Huawei Agile Controller-DCN Brief Brochure [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://e-file.huawei.com/en/marketing-material/onLineView?MaterialID=%7BD3DA9BE8-6BE5-4714-8C9C-BDDEAF6D4303%7D>.

КОШОЕВА Б. Б., АЗИЗБЕК У. Т., АЗАРОВА М. К., БЕЛИКОВ А. С.

РАЗРАБОТКА СТЕНДА «АСУТП РАБОТЫ ПИТАТЕЛЯ СЫРОГО УГЛЯ ДЛЯ ТЭЦ»

Аннотация. Основными типами современных тепловых энергосетей большой мощности являются тепловые электроцентралы (ТЭЦ) с турбинами, имеющими регулируемые отборы пара для производства электрической и тепловой энергии. Одной из предпосылок автоматизации котлов ТЭЦ является рациональное управление технологическими параметрами оборудования с использованием передовой технологии управляющих устройств, отвечающих современным стандартам по безопасности и энергосбережению. В данной работе рассматривается реализация стенда для ТЭЦ на основе оборудования компании ОВЕН.

Ключевые слова: ПЛК ОВЕН, ТЭЦ, котлоагрегат, питатель сырого угля, бункер сырого угля, молотковая мельница.

KOSHOEVA B. B., AZIZBEK U. T., AZAROVA M. K., BELIKOV A. S.

DESIGNING OF WORKBENCH FOR AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM OF RAW COAL FEEDERS OPERATION FOR HEAT AND POWER PLANT

Abstract. The main types of modern high-power thermal power networks are heat and power plants with turbines having controlled steam extraction for the production of electricity and heat. One of the prerequisites for the heat and power plant boilers automation is the rational control of the equipment technological parameters with advanced control devices that meet the modern standards for safety and energy saving. The paper considers the designing of a workbench based on the equipment of the company OWEN.

Keywords: PLC OWEN, heat and power plant, boiler, raw coal feeder, raw coal bunker, hammer mill.

Наиболее важной проблемой перспективного развития тепловой энергетики является дальнейшее технологическое совершенствование ТЭЦ с целью повышения экономичности, надежности и экологической чистоты производства электрической и тепловой энергии. Одним из аспектов технологического совершенствования работы ТЭЦ выступает автоматизация технологического процесса. Автоматическое регулирование работы тепломеханического оборудования ТЭЦ возлагается на локальные регуляторы или группы регуляторов отдельных технологических процессов и параметров. Оптимальными условиями работы ТЭЦ являются: поддержание давления и температуры пара в заданных пределах; экономичное сжигание топлива; соответствие производительности питательной установки нагрузке котлоагрегатов. Перечисленные выше условия выполнимы в том случае, если

топливный продукт сжигания в котлах обладает значительным удельным тепловыделением. Вид топлива для Бишкекская ТЭЦ определен близостью энергетических ресурсов – это уголь Карагандинского и Ташкумырского месторождений, а альтернативное топливо – природный газ. Схема технологического процесса ТЭЦ г. Бишкек представлена на рисунке 1 и отражает прохождение угля на всех стадиях его обработки, начиная с движения со склада до выдачи пыли в горелки.

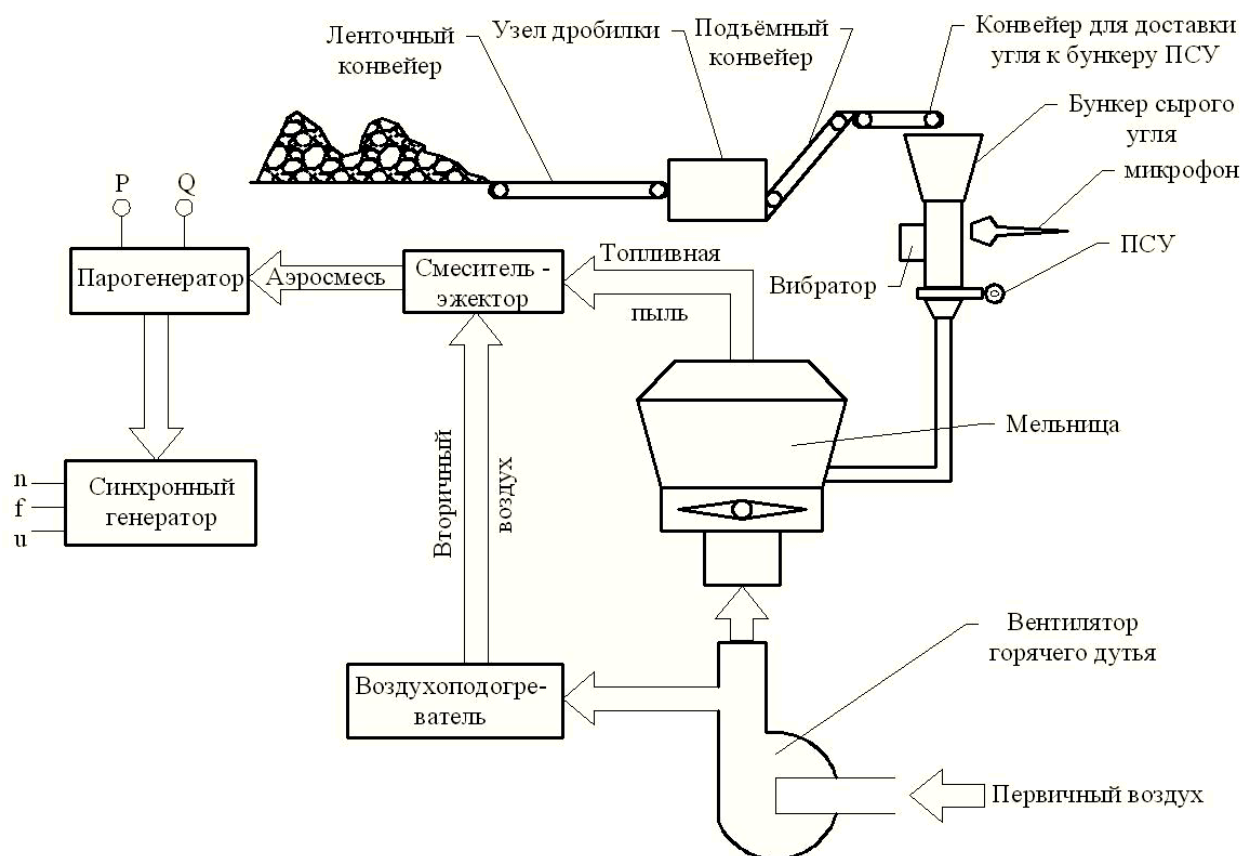


Рис. 1. Схема технологического процесса ТЭЦ г. Бишкек.

Предварительно обработанный в дробильной установке уголь транспортируется в бункера сырого угля ленточными конвейерами. На этой стадии обработки производится очистка угля от посторонних предметов и примесей, поэтому в бункер поступает уголь готовый для дальнейшей обработки.

Распределение угля с конвейера по бункерам сырого угля производится с помощью заслонок, которые, автоматически включаясь и отключаясь, поддерживают наполнение бункеров, исключая их заваливание. Дальнейшее прохождение топлива происходит через пылеприготовитель. Пылесистема Бишкекской ТЭЦ относится к схеме пылеприготовления с прямой подачей топлива в топку котла.

Такие производственные единицы, как молотковая мельница, сепаратор и вентилятор

горячего дутья отнесены к механизмам постоянной производительности, работающим с постоянной скоростью и предназначенным для непрерывной подачи топлива в топку. Они объединены в одно технологическое звено, которое не регулируется, но сведения об их скорости должны поступать на пульт диспетчера для контроля. Основными регулирующими параметрами производства тепловой энергии являются температура и давление пара, а частота и амплитуда напряжения, вырабатываемые турбогенератором, относятся к регулируемым параметрам производства электрической энергии. В Бишкекской ТЭЦ указанные выше параметры, поступающие на пульт диспетчера, используются, в первую очередь, для контроля. По их значениям в полуавтоматическом режиме управление производится диспетчером. Такая форма управления производством тепла и электрической энергии не может удовлетворять современным требованиям полной автоматизации производства.

Для автоматизации управления технологическим процессом производства тепловой и электрической энергии необходимо обеспечить оперативный вывод информации о текущем состоянии любого требуемого параметра. Получая необходимое количество тепла (пара, горячей воды) можно достичь экономичности сжигания топлива, рационального использования электроэнергии для собственных нужд установки и доведения потерь теплоты до минимума. В свою очередь, это обеспечивает надежность и безопасность, т.е. установление и сохранение нормальных условий работы каждого агрегата, исключающих возможность неполадок и аварий как собственного, так и вспомогательного оборудования.

Технологический процесс достаточно сложен, распределен в пространстве и рациональным подходом к его автоматизации будет разделение всего процесса на несколько локальных. К задачам локальных АСУ могут быть отнесены: автоматизация котлоагрегата (автоматизация бункера сырого угля и питателя сырого угля и мельницы (БСУ-ПСУ-М), автоматизация котла); автоматизация турбоагрегата; диспетчеризация и визуализация процесса.

Целью проводимых работ являлась разработка системы автоматизации БСУ-ПСУ-М. В ходе работ было решено создать стенд для отладки предлагаемых технических и программных решений. После принятия решений по выбору базовых средств автоматизации была составлена структурная схема стенда (см. рисунок 2) [1].

Базовыми компонентами стенда являются программируемый логический контроллер ПЛК160, двухканальные измерители TPM200, GSM/GPRS модем ПМ01, панель оператора ПО СП270, блок питания БП. Все компоненты оборудования выпускаются российской компанией ОВЕН.

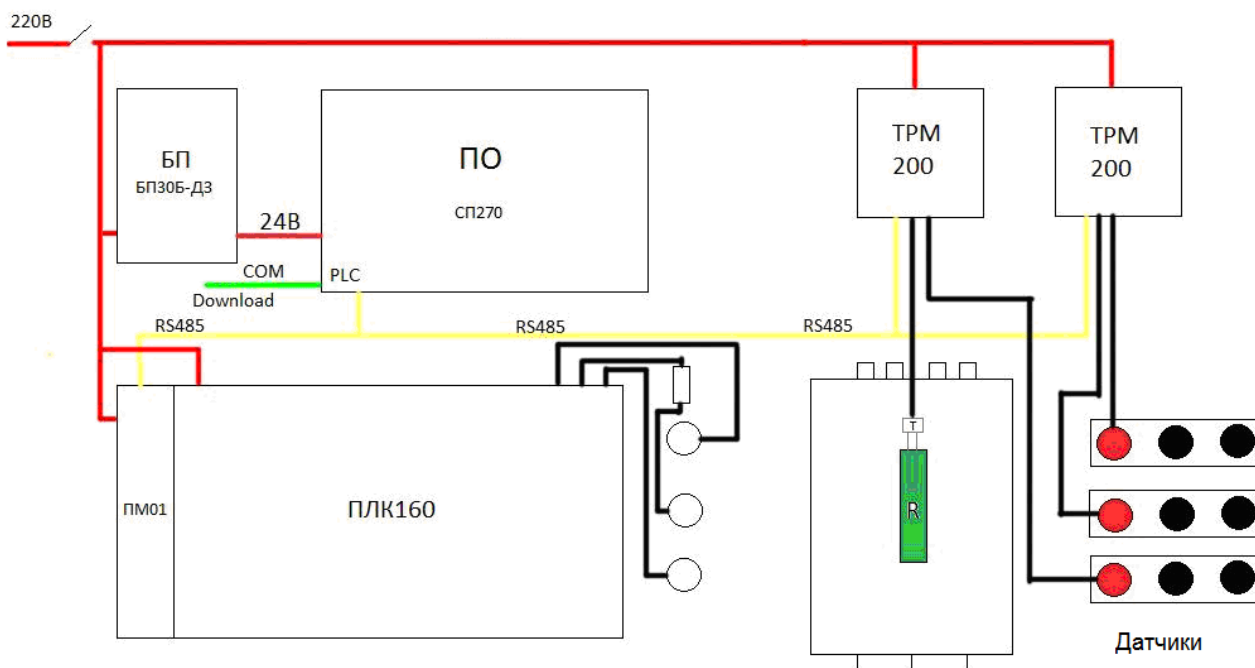
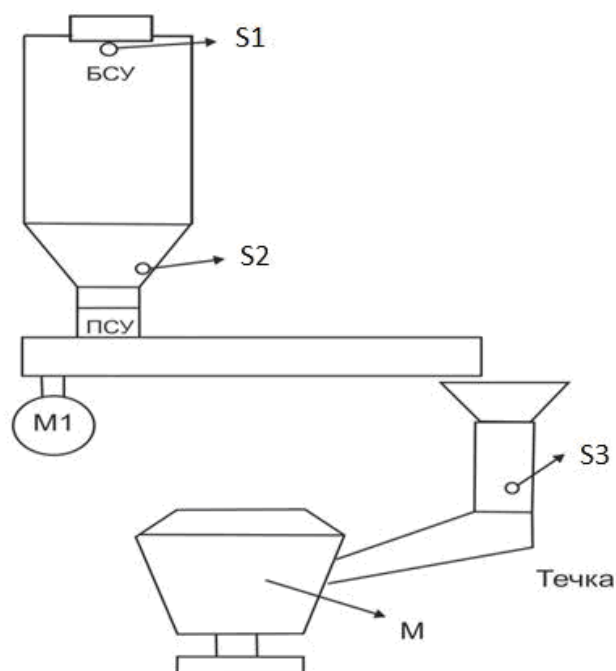


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда.

На рисунке 3 приведена схема, которая поясняет, как сырой уголь с помощью питателя сырого угля (ПСУ) транспортируется из бункера сырого угля (БСУ) в молотковую мельницу (М). Как правило, БСУ загружается до определенной точки, которой соответствует максимальная загрузка угля. По ходу работы ПСУ уровень угля опускается до минимальной точки, если отсутствует постоянная подпитка бункера от конвейера доставки сырого угля.



М1 – мотор;
 S1 – радарный датчик (аналоговый сигнал датчика поступает на измеритель ТРМ200);
 S2 – индуктивный датчик и/или концевой выключатель (в совокупности с S1 позволяет определить зависание угля в БСУ);
 S3 – индуктивный датчик (импульсный сигнал датчика позволяет контролировать проток угля в течке).

Рис. 3. Структурная схема БСУ-ПСУ-М.

Для контроля уровня загрузки БСУ используется радарный датчик, расположенный над бункером. Выходным параметром радарного датчика является аналоговый сигнал, который в дальнейшем поступает на измеритель ТРМ200. Кроме радарного датчика дополнительно может быть использован индуктивный датчик или концевой выключатель с дискретным выходным сигналом. Эти датчики, как правило, устанавливаются перед ПСУ для контроля наличия угля непосредственно у края БСУ, т.е. для формирования сигнала об отсутствии угля перед ПСУ. Соответствующая информация от радарного датчика о неполной загрузке углем БСУ является условием для появления аварийной сигнализации «ЗАВИСАНИЕ УГЛЯ В БСУ». Информация от радарного датчика о минимальном уровне угля в БСУ является командой для включения конвейера для доставки угля в бункер.

Рабочий орган ПСУ порционно получает уголь из бункера и подает его в «течку». В зависимости от расхода тепловой энергии, отдаваемой в теплотрассу от котлоагрегата, возникает задача периодически изменять объем подаваемого угля в молотковую мельницу за счет увеличения зазора заслонки перед рабочим органом ПСУ или за счет регулирования скорости двигателя ПСУ. В статорную обмотку электродвигателя молотковой мельницы включен датчик тока. При изменении нагрузки на валу рабочего органа ток в статорной обмотке может увеличиваться или уменьшаться, что является основой косвенного контроля за подачей угля в мельницу.

Информацией о нагрузке на валу рабочего органа молотковой мельницы может служить выходной сигнал индуктивного датчика или концевого выключателя, предназначенный для контроля наличия угля между скребками. Следует отметить то, что индуктивный датчик или концевой выключатель используется и для контроля целостности рабочего органа ПСУ.

Регулирование скорости вращения электропривода ПСУ, возможно за счет использования преобразовательного устройства, на выход которого включаются статорные обмотки электродвигателя ПСУ. Преобразовательные устройства используются для преобразования переменного тока в постоянный с возможностью регулирования мощности, подаваемой в цепь якоря двигателя постоянного или переменного тока для подачи электрической энергии в статорную обмотку асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Таким образом, использование преобразовательного устройства позволяет регулировать мощность электрической энергии, поступающей на обмотки двигателя. Тем самым осуществляется регулирование механической мощности на валу двигателя.

Термин «течка» специалисты ТЭЦ используют при обозначении промежуточного звена между ПСУ и мельницей. Это звено представляет собой трубу, по которой уголь поступает от питателя сырого угля в мельницу. Контроль прохождения угля через «течку»

производится индуктивными датчиками. Периодически прерываемый сигнал от датчика сигнализирует о протоке угля. Отсутствие прерывания является условием для аварийной сигнализации «ЗАВИСАНИЕ УГЛЯ В ТЕЧКЕ».

Мельница размалывает уголь и при помощи вентилятора горячего дутья (ВГД) отправляет угольную пыль через форсунки в горелки котла.

Внешний вид стенда показан на рисунке 4. Собранный стенд имеет дискретные входы и выходы, к которым подключаются исполнительные механизмы и датчики, так же имеются аналоговые входы и выходы, к которым могут быть подключены аналоговые датчики и измерители. В частности, для автоматизации участка БСУ-ПСУ-М нужен радарный аналоговый датчик для измерения уровня угля в БСУ, который можно подключить к данному стенду, а значения измерений можно видеть на измерителе ТРМ200.



Рис. 4. Внешний вид лабораторного стенда.

Для создания программы автоматизации участка БСУ-ПСУ-М был разработан ее алгоритм. Создание программы осуществлялось в пакете CoDeSys с использованием графического языка CFC. Программа представлена на рисунке 5.

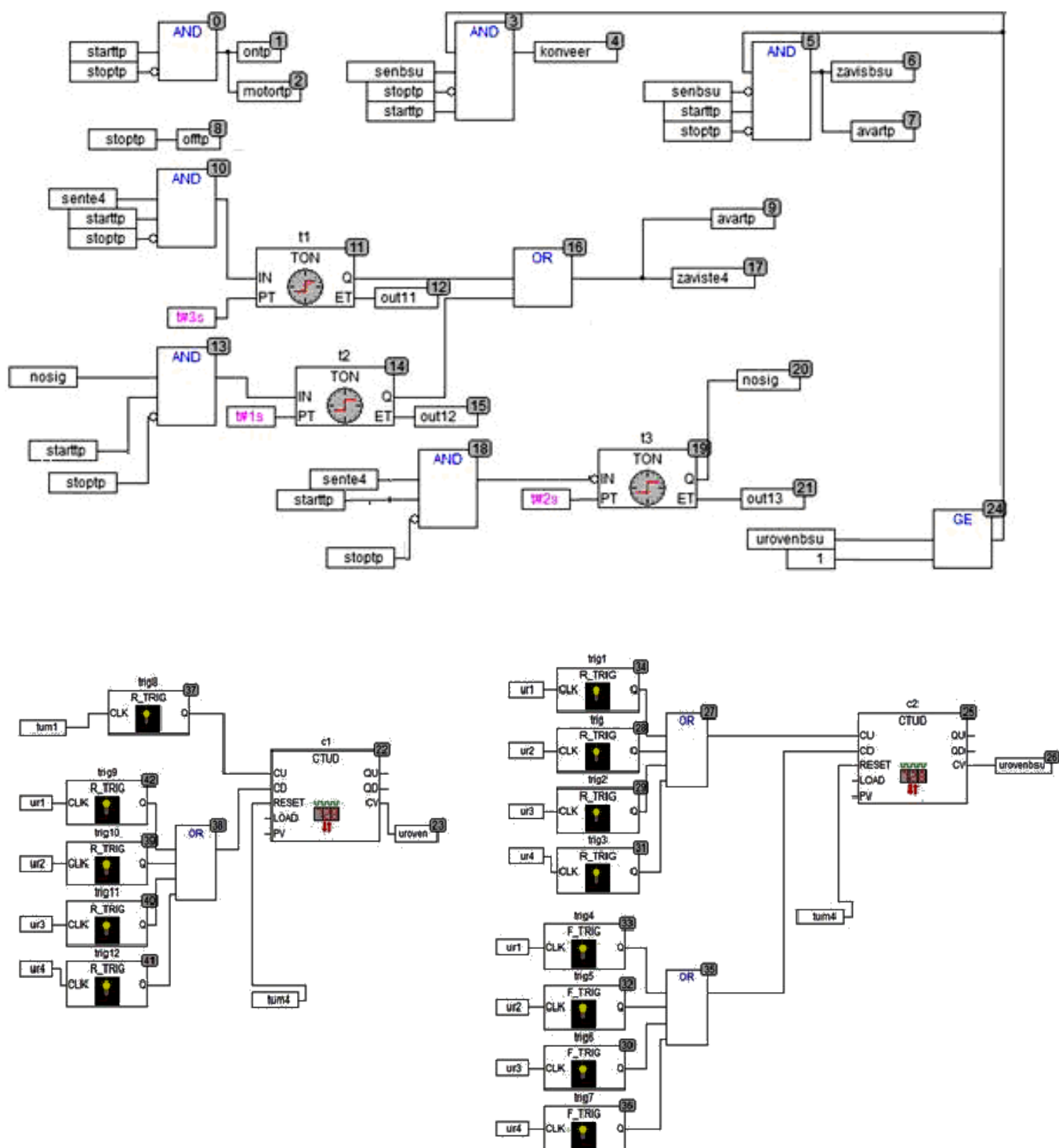


Рис. 5. Программа АСУ участка БСУ-ПСУ-М на графическом языке CFC.

Таблица символов переменных программы представлена в таблице 1.

Таблица символов переменных

Символ	Тип данных	Комментарий
Входы		
Tum1	BOOL	Показывает уровень угля на складе
Ur1	BOOL	Показывают уровень угля в БСУ
Ur2	BOOL	
Ur3	BOOL	
Ur4	BOOL	
Senbsu	BOOL	Контролирует наличие угля у края БСУ
Sente4	BOOL	Контролирует прохождения угля через «течку»
Nosig	BOOL	Сигнализирует о протоке угля
Выходы		
Nosig	BOOL	Периодически прерываемый сигнал
Starttp	BOOL	Кнопка запуска
Stoptp	BOOL	Аварийная кнопка
Ontp	BOOL	Начало работы
Offtp	BOOL	Аварийная остановка
Avartp	BOOL	Аварийное оповещение

В статье представлены первые шаги модернизации ТЭЦ г. Бишкек – проведена автоматизация технологического процесса для участка БСУ-ПСУ-М на базе оборудования и программного обеспечения фирмы ОВЕН. В результате в ТЭЦ будет осуществляться рациональное управление технологическими параметрами оборудования и поддержание оптимальных условий протекания технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Программируемые контроллеры компании ОВЕН. ПЛК160 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.owen.ru/catalog/programmiruemij_logicheskij_kontroller_oven_plk160/opisanie.
2. Шишов О. В. Технические средства автоматизации и управления: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 397 с.
3. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации: учебник. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 468 с.
4. Шишов О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2016. – 365 с.

НИКУЛИН А. В., НИКУЛИН В. В.

**МОДЕЛЬ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО УПРАВЛЯЕМОГО ГЕНЕРАТОРА
КВАДРАТУРНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Аннотация. Рассмотрен вопрос проектирования модели быстродействующего управляемого генератора квадратурных гармонических сигналов в системе схемотехнического моделирования Multisim. Продемонстрирован порядок моделирования и его результаты.

Ключевые слова: квадратурный генератор, гармонический сигнал, перемножитель, управляемый интегратор, виртуальная лабораторная работа.

NIKULIN A. V., NIKULIN V. V.

**HIGH-SPEED MODEL CONTROLLED OSCILLATOR
FOR GENERATING QUADRATURE HARMONIC SIGNALS**

Abstract. The article considers the designing of a high-speed model controlled oscillator for generating quadrature harmonic signals in the circuit simulation system Multisim. The simulation procedure description is included. The simulation results are presented.

Keywords: quadrature oscillator, harmonic signal, multiplier, controlled integrator, virtual lab class.

Постановка задачи. Неотъемлемой частью учебного процесса в вузе при изучении технических дисциплин является лабораторный практикум, задачей которого является формирование у студентов практических навыков работы с оборудованием, получения и обработки экспериментальных данных, умения планировать эксперимент, анализировать и сопоставлять полученные результаты с литературными данными [1–5]. Одним из базовых курсов подготовки студентов по направлению инфокоммуникационные технологии и системы связи является «Теория электрической связи». В этом курсе большой раздел посвящен изучению генераторов электрических сигналов.

В радиоэлектронике, автоматике, системах связи, измерительной технике находят применение управляемые генераторы квадратурных гармонических сигналов [6–9, 11–14]. При этом квадратурный сигнал может использоваться как непосредственно, например, в квадратурном модуляторе, так и для формирования других сигналов. Например, из него можно получить трехфазный сигнал, для получения которого требуются лишь инвертирующий и вычитающий сумматоры.

При перемножении квадратурных сигналов можно получить удвоение частоты [16]. Также не сложно получить сдвинутый на 90° сигнал удвоенной частоты.

Важное место среди устройств обработки сигналов, предназначенных для систем связи, занимают квадратурные модуляторы и демодуляторы: аналоговые и цифровые, используемые в цепях высокой частоты (ВЧ) и ПЧ, соответственно. Они являются универсальными устройствами, которые могут применяться независимо от вида модуляции, но с дополнительным преобразованием модулирующего и демодулируемого сигналов. Квадратурные модуляторы – устройства балансного типа, не требующие фильтрации для выделения суммарной или разностной составляющей модулированного сигнала. Они могут также использоваться в качестве повышающих преобразователей частоты.

Частотно-манипулированные (Frequency Shift Keying, FSK) сигналы – одни из самых распространенных в современной цифровой связи. Это обусловлено прежде всего простотой их генерирования и приема, ввиду нечувствительности к начальной фазе. На практике получила распространение FSK модуляция с непрерывной фазой CPFSK. FSK сигналы являются частным случаем сигналов с частотной модуляцией (FM) при модулирующем сигнале в виде двоичной битовой последовательности. Таким образом, для модуляции FSK можно использовать схему FM модулятора на базе универсального квадратурного модулятора [19].

Квадратурный сигнал используется также при модуляции с одной боковой полосой (Single Side Band, SSB), которая широко применяется в аппаратуре каналообразования с целью повышения эффективности использования спектра канала и мощности передающей радиоаппаратуры.

На базе генераторов квадратурных гармонических сигналов достаточно просто реализовать функциональные генераторы [18].

Для измерителей АЧ и ФЧ характеристик приборов кроме высокой точности формы сигнала требуется высокая скорость перестройки частоты. Такие характеристики имеет разрабатываемый генератор квадратурных сигналов [6–11].

Таким образом, разработка модели и исследование быстродействующего управляемого генератора квадратурных гармонических сигналов для лабораторных применений по курсу «Общая теория связи» является актуальной задачей.

Построение модели генератора. В качестве прототипа управляемого генератора квадратурных сигналов используется структура, заявленная в патенте [17].

Для построения модели генератора в среде схемотехнического моделирования Multisim необходимо реализовать блоки выполняющие операции суммирования, умножения, извлечения корня. Подобные блоки можно построить на основе микросхемы аналогового перемножителя. В библиотеке Multisim имеется модель аналогового перемножителя AD734AQ.

Управляемый интегратор состоит из последовательно включенных умножителя и интегратора. Умножитель выполнен на микросхеме AD734AQ включенной по типовой схеме, показанной на рисунке 1. Величина выходного напряжения определяется по формуле $W = (X1 - X2)(Y1 - Y2)/10V + Z2$. Интегратор выполнен на операционном усилителе AD713BQ (см. рисунок 2).

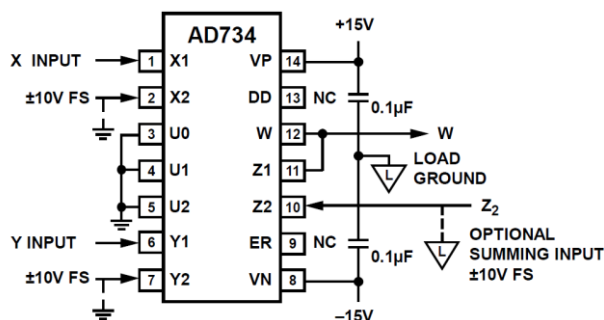


Рис. 1. AD734AQ в режиме умножителя.

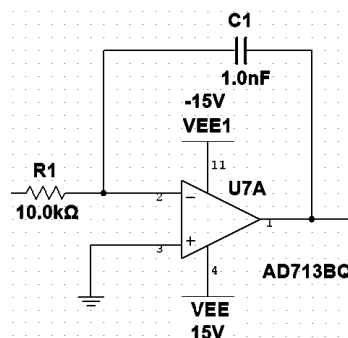


Рис. 2. Интегратор на AD713BQ.

На один из входов перемножителя поступает сигнал с цифрового задатчика частоты. Этот сигнал – постоянное напряжение в диапазоне от 1 до 10 вольт, что позволяет линейно изменять частоту.

Аналогично построен второй интегратор, сигнал на выходе которого повернут относительно первого на 90°. Назовем их сигналами синуса и косинуса соответственно. Сигналы поступают на делители напряжения. Делители построены на микросхеме AD734AQ включенной по типовой схеме в режиме деления (см. рисунок 3). При этом величина сигнала на выходе определяется по формуле $W = 10(Z2 - Z1)/(X1 - X2) + Y1$, где Z1, Z2, X1, X2 – значения входных напряжений. Вход Y1, Z2 заземляются, а на вход X1 подается напряжение 0,1 В.

Сигналы синуса и косинуса так же идут на квадраторы, построенные на микросхеме AD734AQ включенной по типовой схеме в режиме возведения в квадрат. Для этого один и тот же сигнал подается на входы X1 и Y1. Сигналы с квадраторов поступают на неинвертирующий сумматор с коэффициентом суммирования 1, выполненный на операционном усилителе AD713BQ (см. рисунок 4).

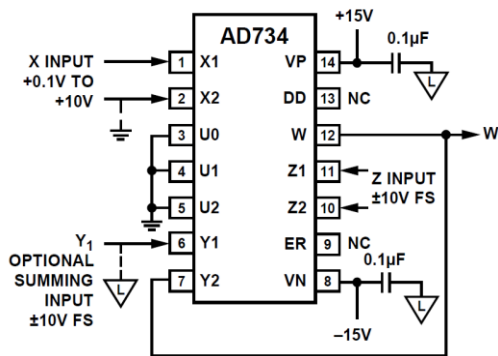


Рис. 3. AD734AQ в режиме делителя.

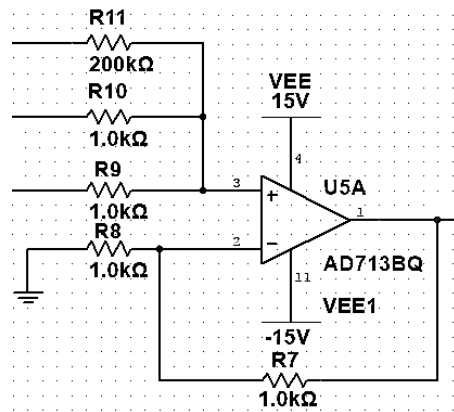


Рис. 4. Неинвертирующий сумматор на AD713BQ.

Далее сигнал поступает на блок извлечения корня. Блок построен так же на микросхеме AD734AQ включенной по типовой схеме в режиме извлечения корня (см. рисунок 5). При этом величина сигнала на выходе определяется по формуле $W = \sqrt{(10V)(Z_2 - Z_1)} + S$, где Z1, Z2 – значения входных напряжений. В схеме используется диод, через который выходное напряжение W подается на Y2 и X1. Входы X2, Y1, U0, U1, U2 заземлены, а на Z1 подается опорное напряжение.

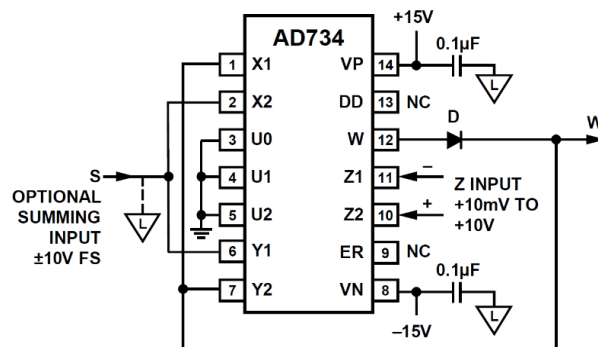
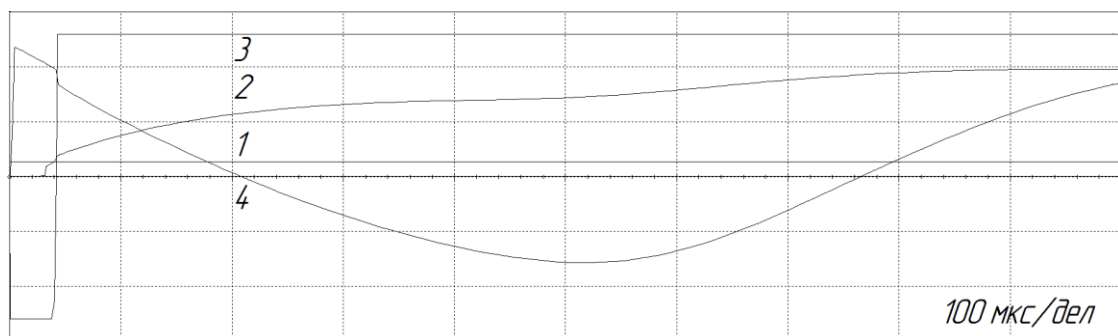
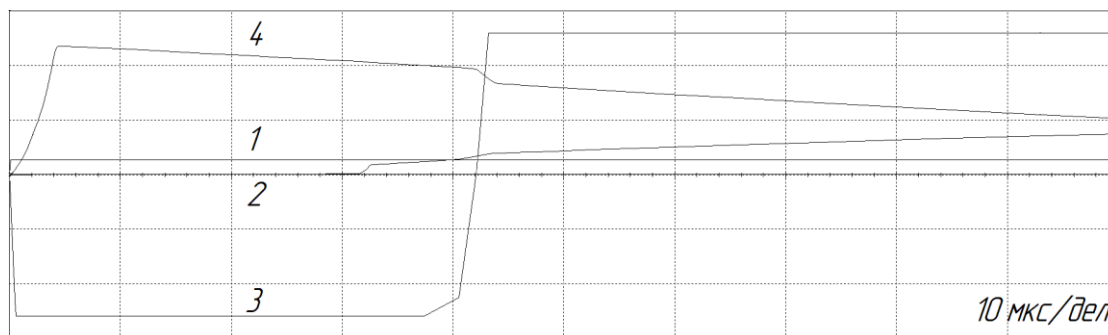


Рис. 5. AD734AQ в режиме извлечения корня.

Сигнал с блока извлечения корня сравнивается с заданным при помощи компаратора, выполненного на операционном усилителе AD713BQ. Это позволяет быстро запустить генератор при включении питания. Диаграммы сигналов при включении генератора показаны на рисунке 6.



а)



б)

1, 2 – сигналы на входе компаратора; 3 – сигнал на выходе компаратора;
4 – сигнал на выходе сумматора.

Рис. 6. Сигналы на компараторе и сумматоре при запуске и различной временной развертке.

Для большей наглядности диаграммы имеют различные временные развертки. 100 мкс/дел (рисунок 6а) и 10 мкс/дел (рисунок 6б). Видно, что после срабатывания компаратора (сигнал 3) величина напряжения на выходе сумматора (см. рисунок 7) уменьшается. Что уменьшает величину входного воздействия на интегратор и останавливает рост амплитуды генерируемого сигнала.

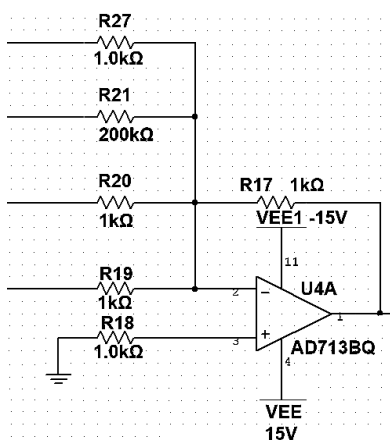


Рис. 7. Инвертирующий сумматор на AD713BQ.

Результаты моделирования. На рисунке 8 показаны диаграммы выходных сигналов в момент скачкообразного изменения задающего напряжения. Изменение частоты сигнала пропорционально изменению задающего напряжения, эта зависимость линейна. Переходный процесс практически отсутствует.

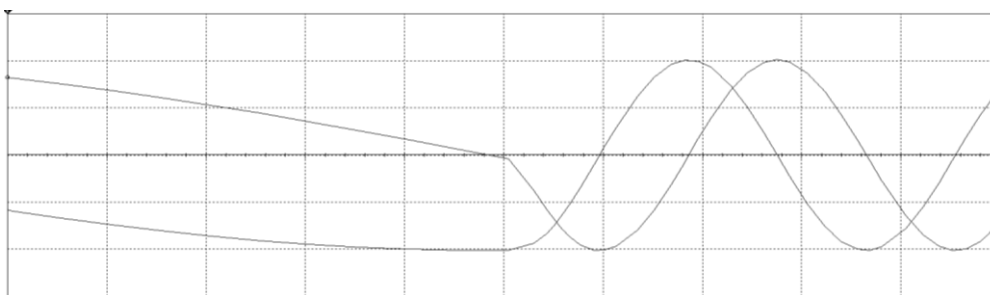


Рис. 8. Выходные сигналы при изменении входного напряжения.

Заключение. Модель схемы генератора квадратурных гармонических сигналов, построенная в программе схемотехнического моделирования Multisim, позволяет сделать следующие выводы:

- разработанный формирователь обладает высокими динамическими свойствами (быстродействием в пусковом режиме и при быстрых переключениях с одной частоты на другую).
- формирователь может быть выполнен в интегральном или гибридном исполнении с использованием современных операционных усилителей и прецизионных аналоговых перемножителей, не требующих наличия подстроечных элементов.
- результаты моделирования [20] близки к результатам, полученным аналитическим методом [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровин В. С., Никулин В. В. Роль виртуальных лабораторных работ в повышении качества подготовки бакалавров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» // Интеграция образования. – 2014. – № 1 (74). – С. 109–115.
2. Никулин В. В., Дубровин В. С. Применение операционных усилителей. Лабораторный практикум. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 48 с.
3. Никулин В. В., Шишов О. В. Моделирование и расчет типовых узлов аналоговой схемотехники: учебное пособие. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 120 с.
4. Никулин А. В., Никулин В. В. О проектировании лабораторных работ по курсу «Основы схемотехники телекоммуникационных устройств» // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах. Сборник докладов и тезисов VI Всероссийской научно-практической конференции. – Волгоград, 2015. – С. 81–84.

5. Никулин А. В., Никулин В. В. О проектировании лабораторных работ по курсу «Основы схемотехники телекоммуникационных устройств» [Электронный ресурс] // Огарев-Online. Раздел «Технические науки». – 2015. – № 11. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/o-proektirovanii-laboratornyx-rabot-po-kursu-osnovy-sxemotexniki-telekommunikacionnyx-ustrojstv>.
6. Дубровин В. С., Никулин В. В., Никулин А. В. Безынерционная система управления формирователя квадратурных гармонических сигналов // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 2 (43). – С. 98–101.
7. Дубровин В. С. Управляемый квадратурный генератор с многоконтурной системой стабилизации // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах. Сборник докладов и тезисов Всероссийской научно-практической конференции. – 2013. – С. 33–37.
8. Дубровин В. С., Никулин В. В. Способ построения управляемых функциональных генераторов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7. – № 6. – С. 22–27.
9. Дубровин В. С., Управляемый формирователь квадратурных гармонических сигналов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 1 (17). – С. 5–12.
10. Дубровин В. С., Никулин В. В. Способ формирования линейно изменяющегося сигнала // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 4 (45). – С. 72–76.
11. Пат. 2551824 Российская Федерация, МПК Н 03 В 27/00, Н 03 В 5/20. Управляемый генератор квадратурных сигналов / В. С. Дубровин, А. М. Зюзин; заявители В. С. Дубровин, А. М. Зюзин; патентообладатель: Частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Саранский Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений». – № 2014131562/08; заявл. 29.07.2014; опубл. 27.05.2015, Бюл. № 15 – 13 с.
12. Дубровин В. С. Генератор ортогональных сигналов // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов. V Всероссийская научно-техническая конференция, 29-30 мая 2007 г. – Пенза, 2007. – С. 154-156.
13. Дубровин В. С. Генератор гармонических колебаний на базе управляемого полосового фильтра второго порядка // Вестник Астраханского государственного

технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 5. – С. 79–87.

14. Дубровин В. С. Система стабилизации управляемого генератора на базе квазиконсервативного звена. // Южно-сибирский научный вестник. – 2012. – № 2. – С. 30–34.

15. Дубровин В. С. Способы построения управляемых функциональных генераторов. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2014. – № 7-8. – С. 131–137.

16. Пат. 80634 Российская Федерация, МПК Н 03 В 27/00, Н 03 В 19/06. Умножитель частоты квадратурных сигналов / В. С. Дубровин, А. М. Зюзин; заявители В. С. Дубровин, А. М. Зюзин; патентообладатель: Частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Саранский Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений». – № 2008143820/22; заявл. 05.11.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4 – 2 с.

17. Пат. 2506692 Российская Федерация, МПК Н 03 В 27/00. Управляемый генератор / В. С. Дубровин; заявитель: В. С. Дубровин; патентообладатель: В. С. Дубровин. – № 2012137334/08; заявл. 31.08.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4 – 22 с.

18. Пат. 104402 Российская Федерация, МПК Н 03 В 27/00. Функциональный генератор / В. С. Дубровин, А. М. Зюзин; заявители В. С. Дубровин, А. М. Зюзин; патентообладатель: Частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Саранский Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений». – № 2011100735/09; заявл. 12.01.2011; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13 – 2 с.

19. Дубровин В. С., Кемайкин Д. М., Володин С. С. Виртуальная лабораторная работа «Двухканальный формирователь частотно-манипулированных сигналов» // Тенденции и перспективы развития науки XXI века. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2016. – С. 188–195.

20. Никулин А. В., Никулин В. В. Построение модели быстродействующего управляемого генератора квадратурных гармонических сигналов // Фундаментальные проблемы системной безопасности. Материалы III школы-семинара молодых ученых: в 2 частях. Ч. 1. – Елец: Изд-во Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2016. – С. 135–139.