

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИОДОВ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМ ПРИ ИХ РАБОТЕ ОТ СЕТЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЗАДАННОМ ТОКЕ НАГРУЗКИ

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF DIODES OF RECTIFICATION CIRCUITS WHEN THEIR OPERATION FROM A NETWORK TRANSFORMER AT A GIVEN LOAD CURRENT

**V. Vorzhev
D. Trints
K. Kalmykova
D. Romanov**

Summary. The article considers the possibility of measuring the parameters of rectifier circuit diodes during their operation from a network transformer loaded with active resistance, the value of which corresponds to a given (nominal) load current for the rectifier circuit under study, which makes it possible to obtain a device for measuring the parameters of rectifier circuit diodes when they are used in typical power supplies. The paper presents a mathematical justification for the possibility of measuring the parameters of diodes by isolating the fundamental harmonic of the variable voltage component. On the basis of the proposed mathematical model, an electrical block diagram of the device is obtained, which is capable of providing the correct conditions for measuring the above-mentioned quantities. The adequacy of the obtained results was verified using the Mathcad software package, as well as electronic models of the main units of the device. The results obtained in the work can be used to design a device for measuring the parameters of diodes in rectifier circuits, as well as to diagnose standard blocks and assemblies of industrial electronics power supplies.

Keywords: testing of blocks and assemblies of radio-electronic equipment, rectifier diodes, rectifier circuits based on diodes, determination of diode parameters.

Воржев Владимир Борисович

*К.ф.-м.н, доцент, Донской Государственный
Технический Университет
caroling@mail.ru*

Тринц Дмитрий Викторович

*Ст. преподаватель, Донской Государственный
Технический Университет*

Калмыкова Ксения Федоровна

*Ассистент, Донской Государственный Технический
Университет*

Романов Дмитрий Леонидович

*Аспирант, Донской Государственный Технический
Университет*

Аннотация. В статье рассмотрена возможность измерения параметров диодов выпрямительных схем при их работе от сетевого трансформатора, нагруженного на активное сопротивление, величина которого соответствует заданному (номинальному) току нагрузки для исследуемой выпрямительной схемы, что создает возможность для получения устройства измерения параметров диодов выпрямительных схем при их использовании в типовых источниках электропитания. В работе приведено математическое обоснование возможности измерения параметров диодов при помощи выделения основной гармоники переменной составляющей напряжения. На основании предложенной математической модели получена электрическая структурная схема устройства, способного обеспечить корректные условия измерения вышеупомянутых величин. Адекватность полученных результатов проверена при помощи программного пакета Mathcad, а также — электронных макетов основных блоков устройства. Полученные в работе результаты могут быть использованы для проектирования устройства измерения параметров диодов выпрямительных схем, а также, — для диагностики типовых блоков и узлов источников электропитания промышленной электроники.

Ключевые слова: испытания блоков и узлов радиоэлектронной аппаратуры, выпрямительные диоды, выпрямительные схемы на диодах, определение параметров диодов.

Введение

Испытания компонентов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является важной частью технологического процесса создания радиоэлектронных устройств, способных работать в заданных электрических режимах (при соответствующем обслуживании) в заявленные производителем сроки с минимальной вероятностью выхода из строя составляющих его бло-

ков и узлов. По этой причине разработка новых, научно обоснованных способов испытания радиоэлектронной аппаратуры и измерения параметров, составляющих ее, блоков и узлов, является актуальной задачей современной электроники и радиотехники [1], [2], [3].

Наряду с этим, уровень развития вычислительных средств позволяет активно привлекать для решения подобных задач специальные программные пакеты,

сделавшиеся в настоящее время инструментарием не только научных сотрудников, но и значительной части инженеров, работающих в данной области. Это позволяет использовать методики, основанные на непосредственном применении этих программных пакетов, в условиях производственного процесса регулировки, наладки и испытаний устройств РЭА. Применение таких методов позволяет получать новые способы испытаний и диагностики компонентов РЭА, расширяя, тем самым, номенклатуру измерительных устройств и расширяя границы их применимости [4–8].

Все вышесказанное обосновывает актуальность настоящей статьи, представляющей способ измерения параметров диодов выпрямительных схем при их работе от сетевого трансформатора, при номинальном токе нагрузки. Достоинством этой измерительной схемы является то, что электрическое состояние диодов в ней соответствует их штатному режиму работы в составе вторичных источников электропитания, что позволяет,— помимо вышеупомянутых измерений,— осуществить проверку других параметров (таких, как предельно допустимый прямой ток, предельно допустимое обратное напряжение и др.).

1. Математическое описание работы построено в предположении линеаризованной модели диодов, согласно которой, электрическое состояние диодов может быть описано, с достаточной для инженерных расчетов точностью, двумя параметрами: напряжением отпираания U_d и динамическим сопротивлением R_d , (определяемыми для всей выпрямительной схемы). Как известно, такое представление весьма оправдано для диодов средней и большой мощности, работающих при достаточно больших амплитудах напряжения, соответствующих выпрямительному режиму.

Рассмотрим математическое описание процесса на примере мостовой схемы выпрямления, которое может быть применено и для любой другой выпрямительной схемы.

Пусть, пульсирующее напряжение на вторичной обмотке трансформатора для всех четных гармоник представлено разложением Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=2}^{2n} U_{m,k} \cos(k\omega t). \tag{1.1}$$

Поскольку используемая в работе линеаризованная модель диодов предполагает их мгновенное отпирание при выполнении условия

$$u(t) > U_d, \tag{1.2}$$

то напряжение на вторичной обмотке будет присутствовать в интервалы времени, определяемые выражением:

$$-\theta < \omega t < \theta, \tag{1.3}$$

где угол отпираания диодов θ определяется по формуле:

$$\cos(\theta) = \frac{U_d}{U_m}, \tag{1.4}$$

где U_m — амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Тогда, постоянная составляющая напряжения на вторичной обмотке трансформатора может быть определена по формуле [9]:

$$U_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{\theta} (U_m \cos(\omega t) - U_d) d\omega t. \tag{1.5}$$

Производя алгебраические преобразования, получим:

$$U_0 = \frac{2}{\pi} (U_m \sin(\theta) - U_d \theta).$$

Учитывая соотношение (1.4),—

$$U_0 = \frac{2U_m}{\pi} (\sin(\theta) - \theta \cos(\theta)). \tag{1.6}$$

Амплитуды переменных составляющих четных гармоник напряжения на вторичной обмотке трансформатора могут быть определены следующим образом [9]:

$$U_{m,k} = \frac{2}{\pi} \int_{-\theta}^{\theta} (U_m \cos(\omega t) - U_d) \cos(k\omega t) d\omega t. \tag{1.7}$$

Производя алгебраические преобразования, с учетом выражения (1.4), получим:

$$U_{m,k} = \frac{2U_m}{\pi} \left(\frac{\sin((k-1)\theta)}{k-1} + \frac{\sin((k+1)\theta)}{k+1} - \frac{2\sin(k\theta)}{k} \cos(\theta) \right). \tag{1.8}$$

Рассмотрим воздействие на исследуемую цепь периодического сигнала, заданного выражением (1.1),

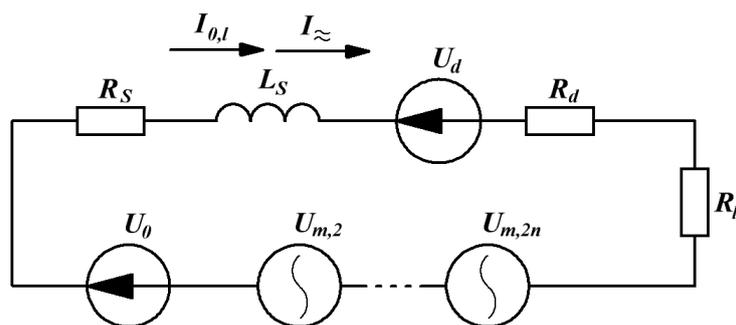


Рис. 1. Схема замещения исследуемой цепи

для которого величины U_0 и U_m, k определяются выражениями (1.6) и (1.8) соответственно. Схема замещения цепи, соответствующая приведенным выше рассуждениям, приведена на рис. 1.

Здесь, величины R_s и L_s представляют собой параметры внутреннего сопротивления сетевого трансформатора, которое, как известно, оказывает существенное влияние на электрическое состояние цепи нагрузки при условии ее работы на номинальном токе. Величины R_s и L_s могут быть определены экспериментально (при помощи опытов холостого хода и короткого замыкания), а также — при помощи оценочных формул, приведенных в соответствующих источниках [10].

Произведем решение электрической цепи, изображенной на рис. 1, символическим методом.

Постоянная составляющая напряжения на нагрузке:

$$U_{0,l} = \frac{U_0 R_l}{R_s + R_d + R_l}. \quad (1.9)$$

Переменная составляющая напряжения на нагрузке:

$$U_{\approx} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=2}^{2n} \frac{U_{m,k}^2 R_l^2}{(r_s + r_d + R_H)^2 + (k\omega L_s)^2}}. \quad (1.10)$$

Система нелинейных уравнений (1.9) и (1.10) позволяет определить угол отпирания θ , определяющий, как напряжение отпирания диодов U_d , так и динамическое сопротивление диодов выпрямительной схемы R_d при экспериментально измеренных величинах постоянной $U_{0,l}$ и переменной U_{\approx} составляющих напряжения на нагрузке.

Решая эту систему уравнений методом подстановки, получим:

$$R_s + R_d + R_l = \frac{U_0}{I_{0,l}}, \quad (1.11)$$

где $I_{0,l}$ — постоянная составляющая тока нагрузки.

Подставим выражение (1.11) в уравнение (1.10):

$$U_{\approx} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{k=2}^{2n} \frac{U_{m,k}^2 R_l^2}{\left(\frac{U_0}{I_{0,l}}\right)^2 + (k\omega L_s)^2}};$$

или, в более удобной для расчетов форме —

$$2U_{\approx}^2 = \sum_{k=2}^{2n} \frac{U_{m,k}^2 R_l^2}{\left(\frac{U_0}{I_{0,l}}\right)^2 + (k\omega L_s)^2}. \quad (1.12)$$

Нелинейное уравнение (1.12) показывает возможность экспериментального определения величины угла отпирания θ , поскольку U_0 и U_m, k , согласно (1.6) и (1.8), являются функциями одной переменной θ .

Однако поиск решения уравнения (1.12) затруднен из-за наличия значительного количества слагаемых, формирующих величину действующего значения напряжения U_{\approx} и требует для его реализации применения микроконтроллера. Значительно упростить поиск решения, не снижая точности вычислений, можно, выделив и измерив действующее значение напряжения основной (в данном случае 2-й) гармоники.

В этом случае, уравнение (1.12) принимает более простой вид:

$$2U_{2,l}^2 = \frac{U_{m,2}^2 R_l^2}{\left(\frac{U_0}{I_{0,l}}\right)^2 + (2\omega L_s)^2}. \quad (1.13)$$

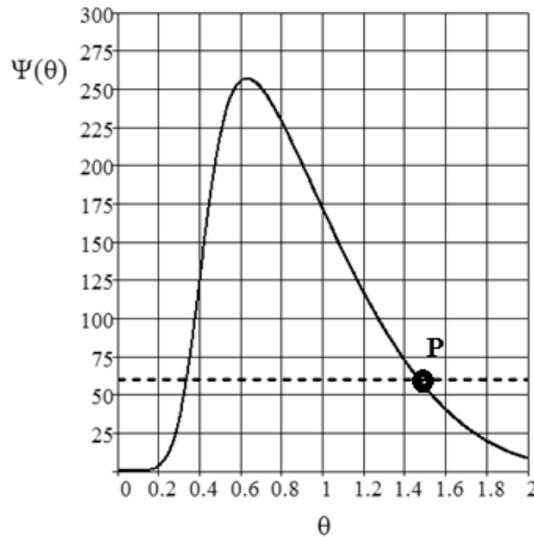


Рис. 2. Результат графического решения нелинейного уравнения (1.14), определяющего угол отпирания θ при заданных параметрах цепи

Тогда, учитывая функциональные зависимости (1.6) и (1.8), окончательно, получим:

$$2U_{2,l}^2 = \frac{\left(\sin(\theta) + \frac{\sin(3\theta)}{3} - \sin(2\theta)\cos(\theta) \right)^2 R_l^2}{\frac{(\sin(\theta) - \theta\cos(\theta))^2}{I_{0,l}^2} + \frac{\pi^2(2\omega L_s)^2}{4U_m^2}}. \quad (1.14)$$

Нелинейное уравнение (1.14) показывает, что для реализации методики определения параметров диодного выпрямителя следует произвести измерение следующих величин: постоянных составляющих тока нагрузки $I_{0,l}$ и напряжения на нагрузке $U_{0,l}$ и действующего значения основной гармоники пульсирующего напряжения на нагрузке $U_{2,l}$. При этом амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_m , активное и индуктивное сопротивления трансформатора R_s и X_s , а также, сопротивление нагрузки (соответствующее номинальному току нагрузки) считаются известными.

После отыскания решения для угла отпирания θ , динамическое сопротивление диодов выпрямительной схемы, согласно (1.11), определяется следующим образом:

$$R_d = \frac{U_0}{I_{0,l}} - R_s - R_l. \quad (1.15)$$

На рис. 2 показан результат решения нелинейного уравнения (1.14) для цепи с выпрямительными диода-

ми типа ВУМ10–1000, включенными в мостовую схему, со следующими параметрами: действующее значение напряжения вторичной обмотки $U = 15$ В; параметры внутреннего сопротивления трансформатора: $R_s = 1,25$ Ом; $L_s = 0,62$ мГн; ток нагрузки $I_{0,l} = 1$ А.

Как видно из рис. 2, уравнение (1.14) содержит два решения для угла отпирания θ . Однако первое (при $\theta \approx 0,34$) не соответствует физическому смыслу задачи, поскольку, согласно принятой модели, величина θ должна быть ненамного меньше $\pi/2$. Этому условию удовлетворяет второе решение при $\theta \approx 1,47$ (точка P на рис. 2).

В результате решения нелинейного уравнения (1.14) были получены следующие параметры диодов выпрямительной схемы: напряжение отпирания $U_d = 2,135$ В; динамическое сопротивление $R_d = 0,187$ Ом. Полученные результаты представляются вполне достоверными, если учесть особенность мостовой выпрямительной схемы, у которой для каждого полупериода сетевого напряжения в открытом состоянии находятся два диода.

2. Электрическая структурная схема измерительного устройства представлена на рис. 3. В схеме учтено, что, в отличие от постоянной составляющей напряжения на нагрузке $U_{0,l}$, измеряемой непосредственно на клеммах нагрузки,— измерение действующего значения переменной составляющей основной гармоники $U_{2,l}$ производится преобразованием электрического сигнала, что обуславливает необходимость калибровки измерительного устройства для выбранного типа трансформатора и заданного тока нагрузки.

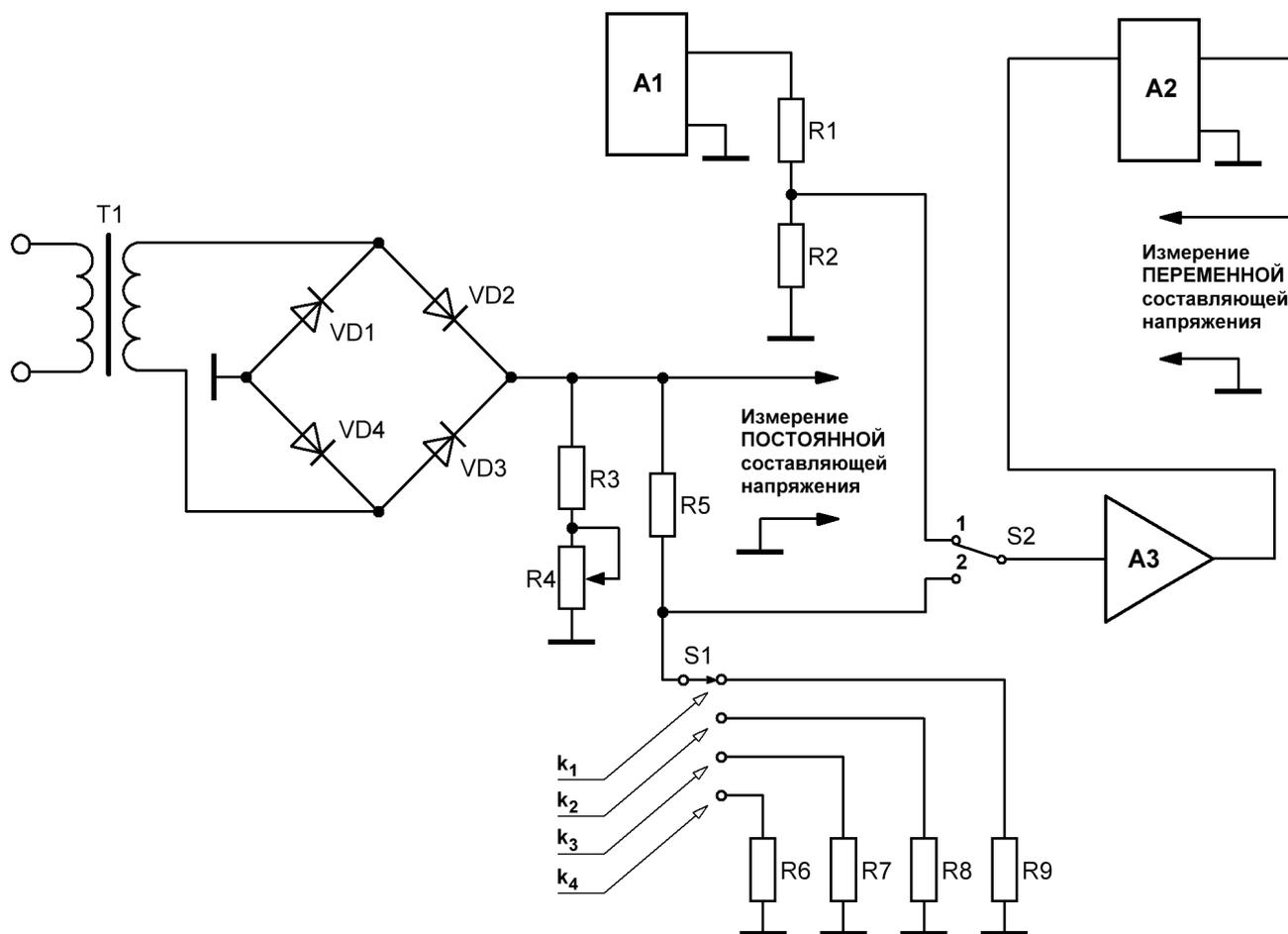


Рис. 3. Электрическая структурная схема устройства

В режиме «Калибровка» (переключатель $S2$ в положении «1») происходит коммутация генератора синусоидального напряжения $A1$ с известным значением выходного напряжения с полосовым фильтром $A2$, рассчитанным на резонансную частоту, равную частоте основной гармоники: $f_0 = f_{ground}$, что позволяет определить коэффициент передачи переменной составляющей основной гармоники полосовым фильтром. В режиме «Измерение» (переключатель $S2$ в положении «2») пульсирующее напряжение с выхода выпрямительной схемы поступает на многопозиционный переключатель $S1$ с известными значениями коэффициентов передачи k_1, k_2, \dots, k_m , снижающий уровень переменной составляющей напряжения, в зависимости от величины напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Далее, через согласующий каскад $A3$, сигнал поступает на вход полосового фильтра $A2$, коэффициент передачи которого (для частоты основной гармоники) определен ранее, в режиме «Калибровка».

Постоянная составляющая напряжения на нагрузке $U_{0,i}$ может быть измерена непосредственно на нагруз-

ке, калиброванной под заданное значение постоянной составляющей тока нагрузки.

Таким образом, приведенная схема позволяет осуществить необходимые измерения с требуемой для инженерных расчетов точностью, в широком диапазоне напряжений на вторичной обмотке трансформатора.

ВЫВОДЫ

Результатами настоящей работы является:

- 1) построение математической модели, позволяющей осуществить измерение параметров диодов выпрямительной схемы при их подключении к сетевому трансформатору, при протекании заданного тока нагрузки;
- 2) получение электрической структурной схемы измерительного устройства, поясняющей возможность реализации данного способа измерения с описанием основных блоков и узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Денисенко, П. Ерещенко, Е. Метелкин, и др. Испытания электронной аппаратуры: быстро и эффективно: статья, журнал «Компоненты и технологии», 5'2004 г.
2. Наседкин А.В., Тюлевин С.В., Пиганов М.Н. Методика производственных испытаний электронных узлов: Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, № 7 (38), 2012, с. 76–84.
3. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: учеб. Пособие для вузов / О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробов, Ю.В. Трегубов; под ред. А.И. Коробова. — М.: Радио и связь, 1987. — 272 с.: ил.
4. Воржев В.Б., Калиенко И.В. Применение математической регрессии для определения параметров трехфазного асинхронного двигателя // Вестник ДГТУ. — 2013. — № 5/6 (74) .
5. Воржев В.Б., Балдин О.В., Рогов И.Е. Аппроксимация вольтамперных характеристик полевых транзисторов экспоненциальными кривыми с полиномиальными показателями // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]: электрон. науч. журн. — 2015. — № 2. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/129-21621>
6. Воржев В.Б., Калиенко И.В. Аппроксимация вольтамперных характеристик полевых транзисторов на основе кубических сглаживающих сплайнов // Измерительная техника. Май, 2001. с. 60–63.
7. Воржев В.Б. Руденко Н.В. Метод расчета электрических цепей с индукционной катушкой с насыщенным магнитным сердечником (науч. статья на англ. яз.) // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) . — 2020. — 5 p. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9111931>.
8. Воржев В.Б. Руденко Н.В., Малько П.П., Дергоусов В.А. Повышение надёжности электрооборудования аграрно-промышленного комплекса на основе измерения электрической емкости конденсаторов (науч. статья на англ. яз.) // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 273. — Article 07029. — (XIV International Scientific and Practical Conference «State and Prospects for the Development of Agribusiness — INTERAGROMASH 2021» Rostov-on-Don, Russia, February 24–26, 2021) . — URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/49/e3sconf_interagromash2021_07029.pdf.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Учебник для ВУЗов. — М.: «Высшая школа», 1984 г. 559 с.
10. Березин О.К., Костиков В.Г., Шахнов В.А. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры. Издательско-полиграфическое Агентство «Три Л», 2000 г.

© Воржев Владимир Борисович (caroling@mail.ru), Тринц Дмитрий Викторович,
Калмыкова Ксения Федоровна, Романов Дмитрий Леонидович.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»