

**7200**

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет  
им. В.Ф.Уткина»

**КРЮКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНИЖАЮЩЕГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Учебное электронное издание комплексного распространения

Рязань РГРТУ 2022

© Все права защищены

**УДК 621.311.6: 621.396.6**

**ББК 31.264.5**

### **Электропреобразовательные устройства**

Для студентов специальностей 11.03.01 Радиотехника, 11.05.01

Радиоэлектронные системы и комплексы

В ходе работы формируются **компетенции ПК-2:**

Способен реализовать программы экспериментальных исследований, включая выбор технических средств и обработку результатов.

Способен организовывать и проводить экспериментальные исследования с целью оценки качества предоставляемых услуг, соответствия требованиям технических регламентов, международных и национальных стандартов и иных нормативных документов.

Способен разрабатывать структурные и функциональные схемы радиоэлектронных систем и комплексов, а также принципиальные схемы радиоэлектронных устройств с применением современных САПР и пакетов прикладных программ.

### **Литература, использованная автором:**

1. Электропреобразовательные устройства: методические указания к лабораторным работам / Рязан. гос. радиотехн. ун-т, сост.: Н.Г.Кипарисов, П.А.Крестов, В.Н.Сухоруков. Рязань, 2016, 56 с.
2. Сайт Texas Instruments. [Электронный ресурс] <https://www.ti.com>

**Минимальные системные требования:** Процессор 1,3 GGz, 512 Мб RAM, SVGA (800x600), HDD 3 Gb, просмотрщик документов в формате \*.pdf

Зарегистрировано редакционно-издательским центром РГРТУ  
391005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1 21.03.2022 № 7200 Объем 1,9 Мб.  
Тел. (4912) 72-03-48, Email: [kryukov.a.n@rsreu.ru](mailto:kryukov.a.n@rsreu.ru), <https://www.rsreu.ru>

## Цели:

- разработать принципиальную схему импульсного понижающего преобразователя напряжения;
- реализовать программу экспериментальных исследований;
- экспериментально исследовать зависимости выходного напряжения преобразователя от входного, выходного напряжения от выходного тока;
- оценить качество стабилизации напряжения;

## Введение

Ниже приведено пошаговое руководство по online разработке на сайте Texas Instruments принципиальной схемы понижающего преобразователя напряжения (DC-DC, конвертера) и исследованию его выходных характеристик с помощью САПР WEBENCH Power Designer. Руководство предполагает владение английским языком на уровне пользователя, наличие регистрации на сайте <https://www.ti.com> (для этого потребуется электронная почта за пределами РФ – например, на gmail.com). Для входа на сайт можно использовать VPN, браузеры Google Chrome, Firefox не ниже 60 версии, разрешение экрана не хуже 1280x1024.

Результаты работы - принципиальная схема преобразователя, спецификация элементов, производимых Texas Instruments и её партнёрами, печатная плата, графики зависимостей выходного напряжения при увеличении нагрузки и изменении входного напряжения, ряд дополнительных параметров - доступны для скачивания после регистрации на сайте Texas Instruments. Схему можно экспортировать в Altium Designer, Cadence OrCAD, TINA-TI, CadSoft EAGLE, Mentor Graphics, P-CAD.

Отчёт по лабораторной работе содержит титульный лист, цели, обоснования выбора ИС, принципиальную схему (обозначения элементов должны читаться), графики реакций на изменения входного напряжения и выходного тока, пульсаций, таблицы, расчёты, выходные характеристики, выводы. Файлы online результатов исследований прилагаются к отчёту.

### **Исходные данные для проектирования:**

Входное напряжение  $V_{in\ Min} = \text{№ журн} + 10\ В$ ,  $V_{in\ Max} = \text{№ журн} + 16\ В$ ,

Выходное напряжение  $V_{out} = \text{третья цифра № группы} + \text{№ журн}$ , В

Выходной ток  $I_{Out\ Max} = 4\ А - 0,1(\text{№ журн})$ , А

Входной импульсный ток — минимальное значение

# 1. Подготовка к проектированию

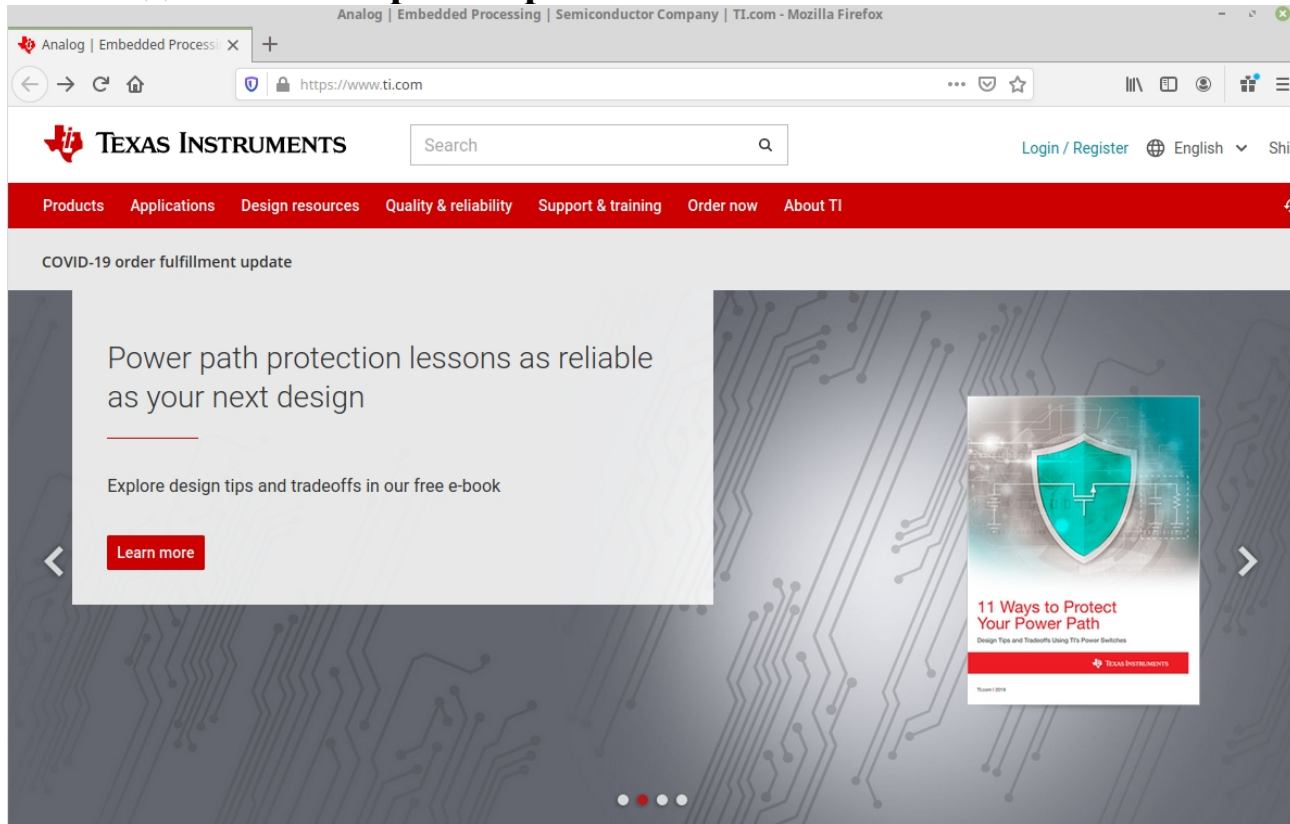



Рисунок 1. Вход на сайт Texas Instruments. [Нажмите Login](#)

myTI account; myTI login; personal TI account | TI.com - Mozilla Firefox

myTI account; myTI login; pe x

https://login.ti.com/as/authorization.oauth2?res

 **TEXAS INSTRUMENTS**

Products Applications Design resources Quality & reliability Support & training Order now About TI

myTI account

[myTI FAQ](#)

Existing myTI user?

Your email address

XXXX.XXXX@gmail.com

Your myTI password

.....

Remember me

**Login**

[Forgot your password?](#)

New user?

\* Required

\* Country or region  \* Zip or postal code

\* Company/university

\* First name  \* Last name

\* Your email address  \* Confirm email address


 Privacy - Terms

Рисунок 2. Ввод пароля. Введите e-mail, password, нажмите **Login**

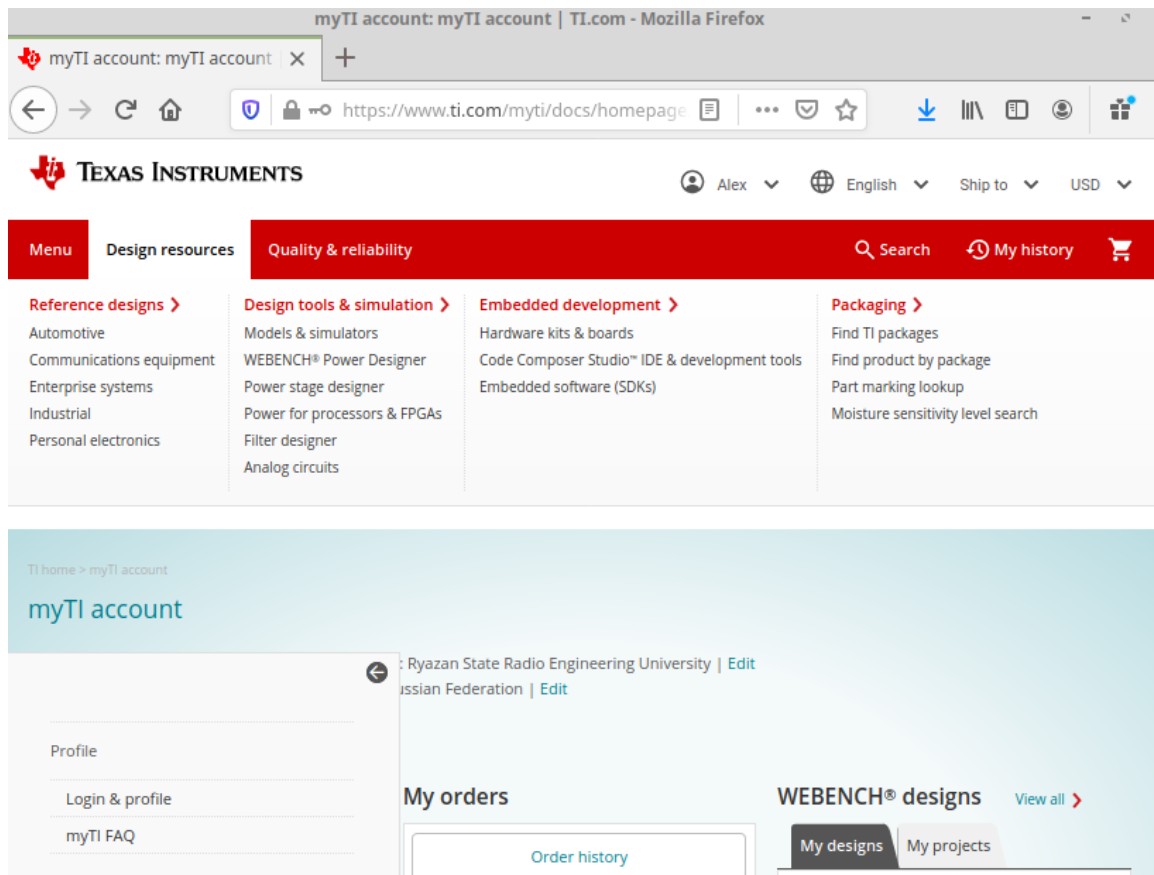


Рисунок 3. Выбор САПР WEBENCH Power Designer



## 2. Начало проектирования

The screenshot shows the WEBENCH Power Designer website in a Mozilla Firefox browser. The browser's address bar displays the URL <https://www.ti.com/design-resources/design>. On the left side, there is a navigation menu with the following items: WEBENCH® Power Designer, Power stage designer, Power for processors & FPGAs, Filter designer, Analog circuits, Embedded development, Hardware kits & boards, Code Composer Studio™ IDE & development tools, Embedded software (SDKs), and Third-Party Network. The main content area features a header with the text "Get started with the industry's most powerful end-to-end de...", followed by a paragraph: "WEBENCH® Power Designer creates customized power supply circuits b... end power supply design capabilities that save you time during all phase...". Below this is a horizontal navigation bar with links: Try now | Design | Easy to use | Latest features | Support and traini... The WEBENCH® POWER DESIGNER logo is prominently displayed. Below the logo, the text reads: "Easy power supply design. Select. Customize. Simulate. Export." and "The new improved WEBENCH Power Designer makes designing power supplies easy." A list of features follows: 

- Intuitive form inputs
- New improved layout
- Simulate, optimize, export, repeat...

 At the bottom of the main content area, there is a red button labeled "Try Power Designer now". On the right side, a portion of a laptop screen is visible, showing the WEBENCH Power Designer software interface with a "Select a Design" dialog box and various configuration options.

Рисунок 4. Выбор нового проекта. Нажмите **Try Power Designer now**

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator

WEBENCH® POWER DESIGNER LOGIN

## Create a new DC/DC power design

WEBENCH® Power Designer creates customized power supply circuits based on your requirements. The environment gives you end-to-end power supply design capabilities that save you time during all phases of the design process. [Learn more](#)

Part Number

### Input

Supply type is

DC  AC

Vin Min \* 15 V (-50 - 500)

Vin Max \* 24 V (-50 - 500)

Advanced

### Output

Vout \* 12.5 V (-80 - 500)

Iout Max \* 2 A (0 - 180)

Isolated Output

Advanced

### Design Consideration

I want my design to be

Balanced  Low Cost  High Efficiency  Small Footprint

Design Parameters

I agree that the use of TI's WEBENCH tools is subject to the [Webench Notice](#), [TI's Site Terms and Conditions of Use](#), and [TI's Privacy Policy](#).

VIEW DESIGNS

Рисунок 5. Ввод данных проектирования. В конце нажмите **View Designs**

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/select

WEBENCH® POWER DESIGNER

NEW DESIGN LOGIN

### Select a Design

Input: DC 15 V - 24 V

Output: 12.5 V at 2 A Temp: 30 °C

Change **SELECT** CUSTOMIZE SIMULATE EXPORT

Filters CLEAR FILTERS

Filter by Part Number

Regulator Type

- Module (Integrated Inductor)
- Converter (Integrated Switch)
- Controller (External Switch)

Design Attributes

Efficiency (%)

89 - 99


187 matching designs out of 187 total designs

Sort by: Default

TABLE VIEW

**LMR33630B-SOIC**  Compare

SIMPLE SWITCHER®  
3.8V to 36V, 3A  
Synchronous Buck  
Converter With Ultra-Low  
EMI



Efficiency: 94.6%

BOM Cost: \$1.88

Footprint: 206 mm<sup>2</sup>

BOM Count: 13

Topology: Buck

Frequency: 1.4 MHz

IC Cost: \$0.75 | 1ku

CUSTOMIZE SIMULATE EXPORT

Рисунок 6. Исходным данным удовлетворяют 187 вариантов

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer x +

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/select

WEBENCH® POWER DESIGNER NEW DESIGN LOGIN

Select a Design

Input: DC 15 V - 24 V Output: 12.5 V at 2 A Temp: 30 °C Change

SELECT CUSTOMIZE SIMULATE EXPORT

151 matching designs out of 187 total designs

Sort by: Default TABLE VIEW

Filters CLEAR FILTERS

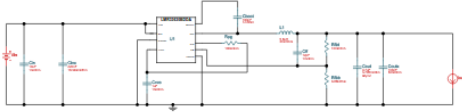
Filter by Part Number

Regulator Type

- Module (Integrated Inductor)
- Converter (Integrated Switch)
- Controller (External Switch)

Design Attributes

Efficiency (%)



**LMR33630B-SOIC**  Compare

SIMPLE SWITCHER® 3.8V to 36V, 3A  
Synchronous Buck Converter With Ultra-Low EMI

Efficiency:	94.6%
BOM Cost:	\$1.88
Footprint:	206 mm²
BOM Count:	13
Topology:	Buck
Frequency:	1.4 MHz
IC Cost:	\$0.75   1ku

CUSTOMIZE SIMULATE EXPORT

Рисунок 7. Выберем **Converter** - преобразователь напряжения

Если выбор **Converter** невозможен, выбирайте **Controller**.

На рисунке 7 выбору удовлетворяют 151 вариант ИС. Выбираемая ИС должна иметь красную надпись **SIMULATE**.

### 3. Разработка принципиальной схемы преобразователя

The screenshot shows the TI WEBENCH Power Designer interface. The top navigation bar is red with the text "WEBENCH® POWER DESIGNER" and a "NEW DESIGN" button. Below the navigation bar, the page title is "Select a Design". The main content area is divided into three sections: "Input: DC 15 V - 24 V", "Output: 12.5 V at 2 A", and "Temp: 30 °C". The "SELECT" button is highlighted in red. On the left side, there is a "Filters" panel with a "CLEAR FILTERS" button and a "Filter by Part Number" input field. Below the filter panel, there are two expandable sections: "Regulator Type" and "Design Attributes". The "Regulator Type" section has three options: "Module (Integrated Inductor)", "Converter (Integrated Switch)" (which is selected with a checkmark), and "Controller (External Switch)". The "Design Attributes" section is currently collapsed. The main content area displays a circuit diagram of a buck converter using the TPS54531 IC. To the right of the circuit diagram, the component details for the TPS54531 are listed: "3.5V to 28V Input, 5A, 570kHz Step-Down Converter with Eco-mode". The details include: Efficiency: 94.9%, BOM Cost: \$2.21, Footprint: 380 mm², BOM Count: 14, Topology: Buck, Frequency: 570 kHz, and IC Cost: \$0.53 | 1ku. A "Compare" button with a checkmark is located to the right of the component name. At the bottom of the component details, there are three buttons: "CUSTOMIZE", "SIMULATE", and "EXPORT".

Рисунок 8. Выбор (**Compare**) ИС TPS54531.

Выбор должен быть обоснован (например, самая дешёвая, самый большой КПД, меньше всего навесных элементов, меньше размер печатной платы)

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer x +

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/simulate/6?noparams=0

WEBENCH® POWER DESIGNER

NEW DESIGN MY DESIGNS

Simulate TPS54531DDAR - 15V-24V to 12.50V @ 2A

Input: DC 15 V - 24 V Output: 12.5 V at 2 A Temp: 30 °C Change

SELECT CUSTOMIZE **SIMULATE** EXPORT

Simulations ←

Run New Simulation

- Bode Plot
- Startup
- Load Transient
- Input Transient
- Steady State

START

Bode Plot

Schematic

To change components, click Customize on the header

Waveform

Some simulations may take up to 15 minutes.

Рисунок 9. Принципиальная схема разрабатываемого преобразователя. В отчёте номиналы радиоэлементов должны читаться.

В процессе исследования необходимо выполнить все симуляции — Bode Plot, Startup, Load Transient, Input Transient, Steady State, нажимая **START**

## 4. Исследование преобразователя напряжения

The screenshot displays the WEBENCH POWER DESIGNER interface. At the top, the browser address bar shows the URL: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/simulate/67noparams=0>. The main header includes the text "WEBENCH® POWER DESIGNER" and navigation options "NEW DESIGN" and "MY DESIGNS". Below this, the simulation title is "Simulate TPS54531DDAR - 15V-24V to 12.50V @ 2A", with sub-parameters: "Input: DC 15 V - 24 V", "Output: 12.5 V at 2 A", and "Temp: 30 °C". A navigation bar contains "SELECT", "CUSTOMIZE", "SIMULATE" (highlighted), and "EXPORT".

The "Simulations" sidebar on the left lists options: "Run New Simulation", "Bode Plot", "Startup", "Load Transient" (selected with a radio button), "Input Transient", and "Steady State". A red "START" button is positioned below these options.

The main area shows a "Schematic" of the TPS54531 converter circuit. The central component is the TPS54531 IC (U1). The input side features a voltage source (Vin) and an inductor (Lin). The output side includes a bootstrap capacitor (Cboot), a MOSFET (ISwitch), a diode (D1), and an inductor (L1). Compensation components include a resistor (Rcomp), a capacitor (Ccomp), and a capacitor (Ccomp2). The output is connected to a load resistor. The right side of the interface shows a "Waveform" section with a note: "Some simulations may take up to 15 minutes."

Рисунок 10. Выбор исследования набора нагрузки Load Transient **START**

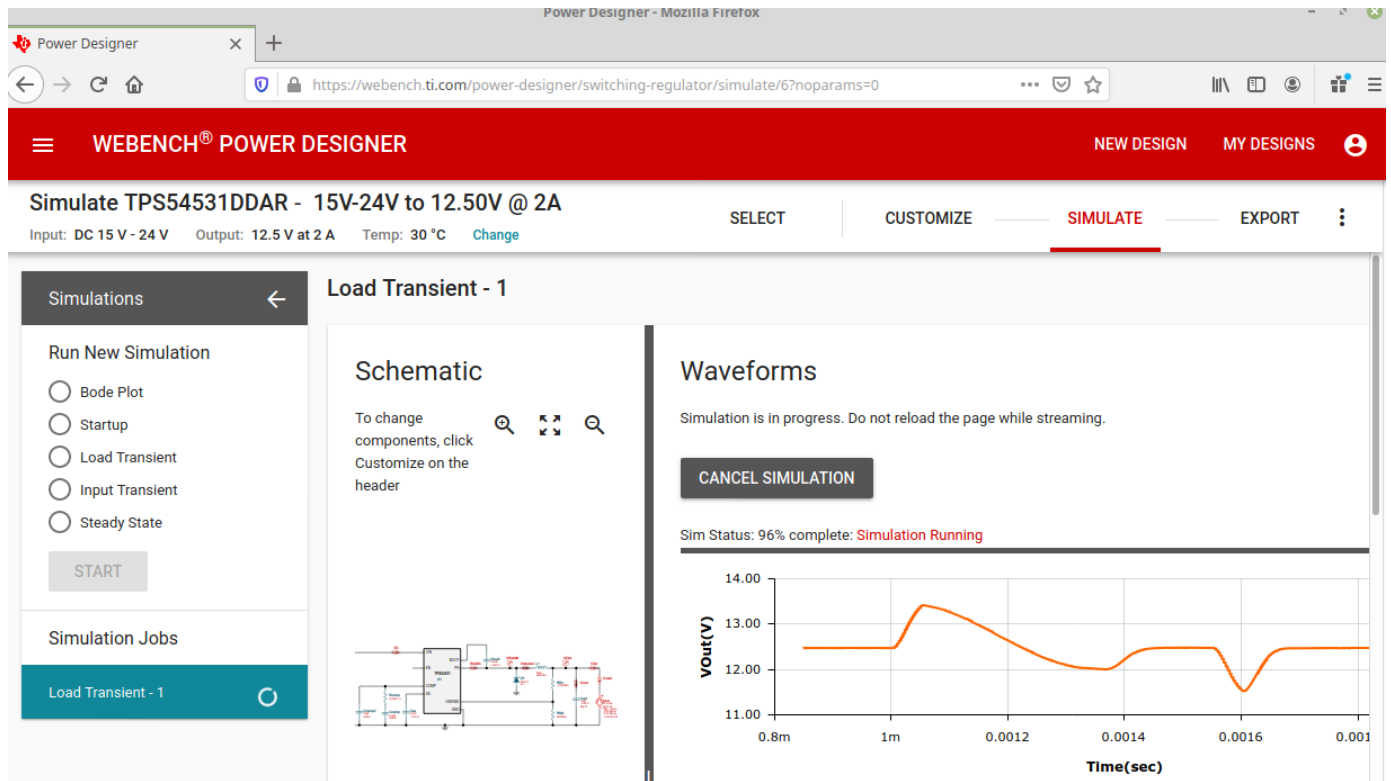


Рисунок 11. Идёт исследование



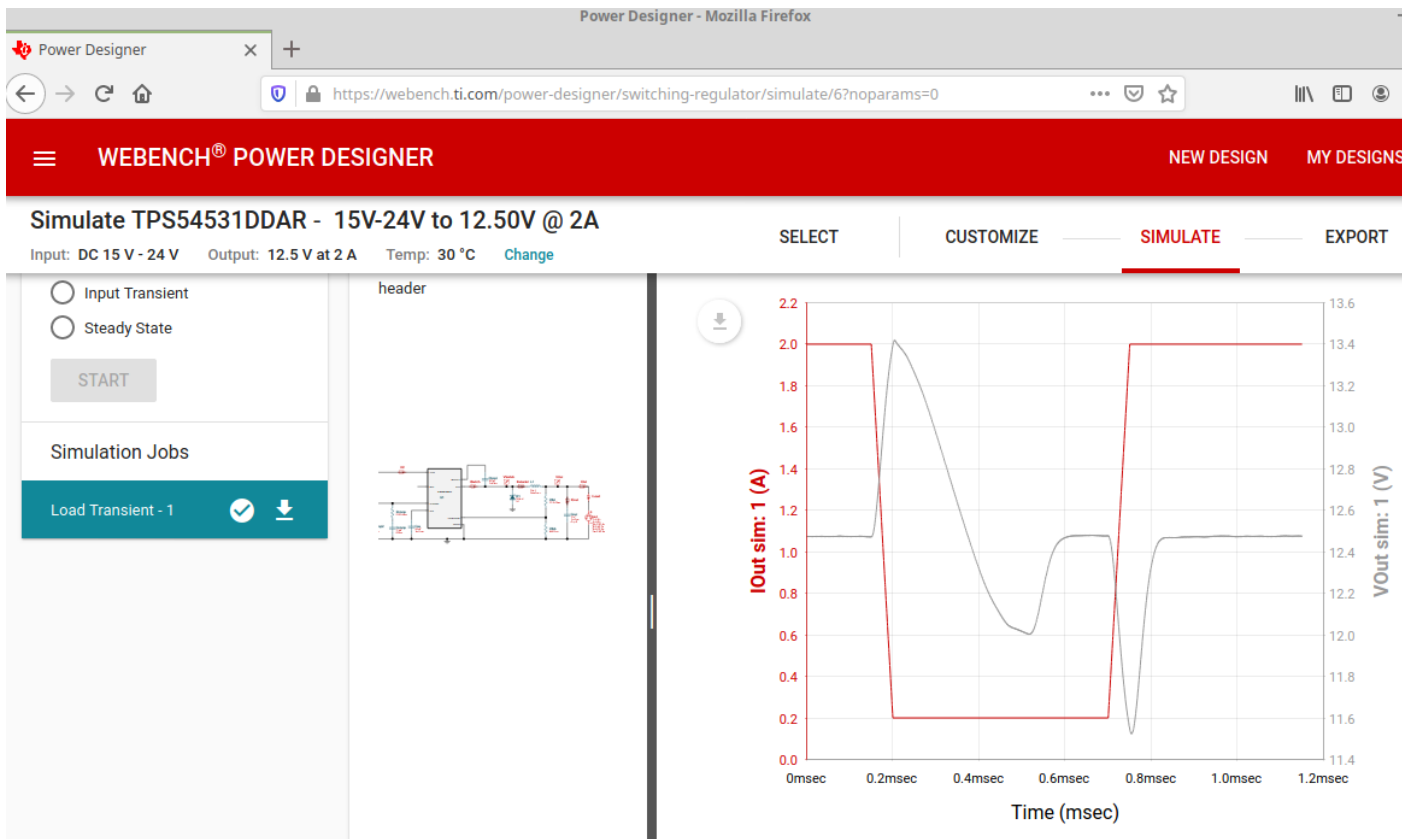


Рисунок 12. Реакция преобразователя напряжения на рост выходного тока

The image shows a web browser window displaying the WEBENCH Power Designer simulation interface. The browser title is "Power Designer - Mozilla Firefox" and the address bar shows the URL: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/simulate/6?noparams=0>. The page header includes the WEBENCH logo and navigation links for "NEW DESIGN" and "MY DESIGN".

The main simulation area is titled "Simulate TPS54531DDAR - 15V-24V to 12.50V @ 2A". Below the title, the input and output parameters are listed: "Input: DC 15 V - 24 V", "Output: 12.5 V at 2 A", and "Temp: 30 °C". There are radio buttons for "Input Transient" and "Steady State", and a "START" button.

On the left, under "Simulation Jobs", there is a button for "Load Transient - 1" with a checkmark and a download icon. The central area shows a circuit diagram labeled "header".

On the right, there is a graph showing simulation results. The x-axis is "Time (msec)" ranging from 0.0 to 1.2. The left y-axis is "IOut sim: 1 (A)" ranging from 0.0 to 2.2. The right y-axis is "VOut sim: 1 (V)" ranging from 11.4 to 13.6. A red line represents the current, and a blue line represents the voltage. A download icon is visible above the graph.

A file dialog box is overlaid on the graph, titled "Открытие «WBDesign6\_Load Transient-1.pdf»". The dialog contains the following text: "Вы собираетесь открыть: WBDesign6\_Load Transient-1.pdf являющийся: Формат переносимых документов (PDF) (19 из blob)". Below this, it asks "Как Firefox следует обработать этот файл?" with three options: "Открыть с помощью Firefox", "Открыть в" (with a dropdown menu set to "Просмотр документов (по умолчанию...)"), and "Сохранить файл" (which is selected). There are "Отмена" and "ОК" buttons at the bottom.

Рисунок 13. Сохранение результатов исследования в файл

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer x +

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/simulate/6?noparams=0

WEBENCH® POWER DESIGNER NEW DESIGN

### Simulate TPS54531DDAR - 15V-24V to 12.50V @ 2A



Input: DC 15 V - 24 V Output: 12.5 V at 2 A Temp: 30 °C [Change](#) SELECT CUSTOMIZE **SIMULATE**

#### Simulations

- Bode Plot
- Startup
- Load Transient
- Input Transient
- Steady State




**START**

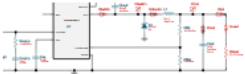
#### Simulation Jobs

Load Transient - 1  

#### Input Transient

##### Schematic

To change components, click     
Customize on the header



##### Waveforms

Some simulations may take up to 15 minutes.

Рисунок 14. Выбор исследования изменения напряжения **Input Transient**

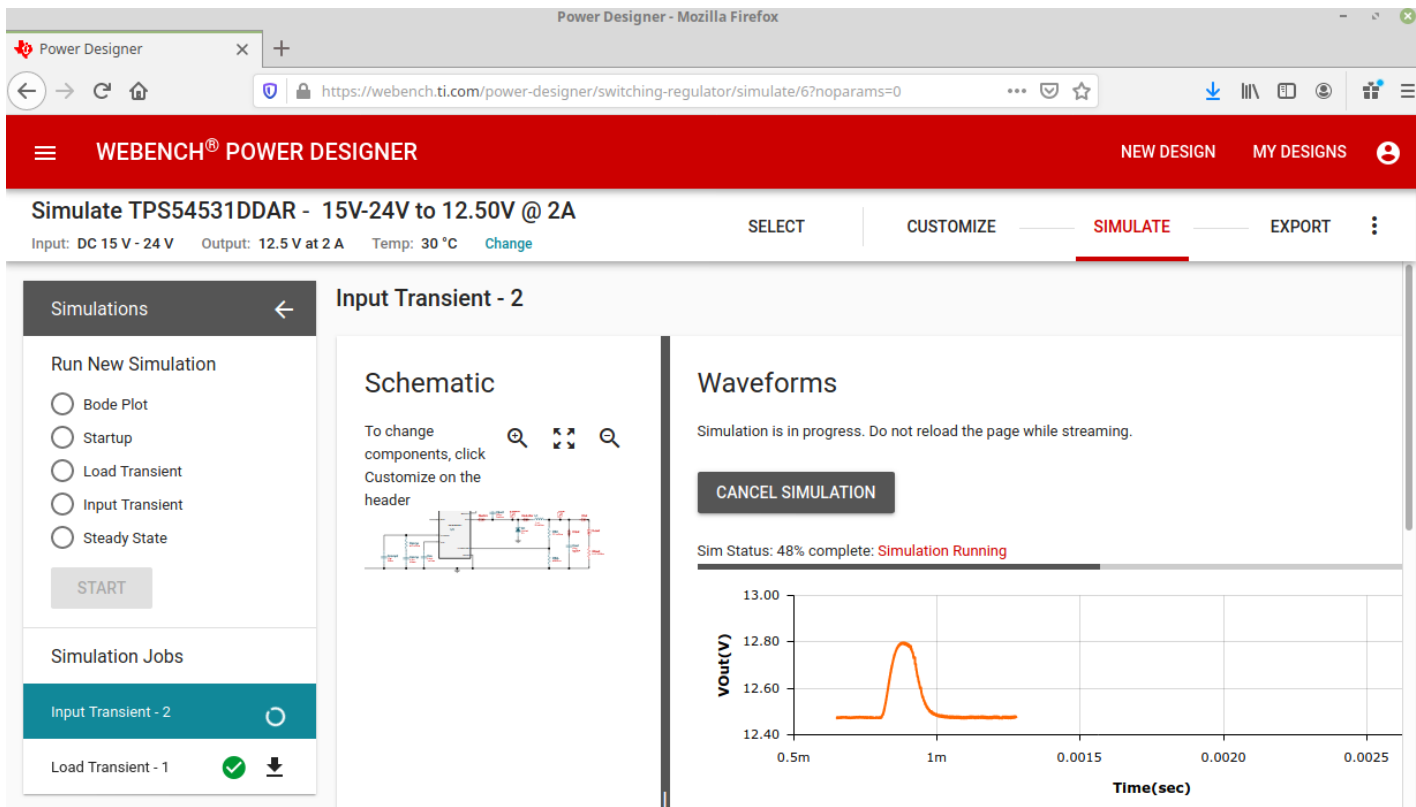


Рисунок 15. Идёт исследование

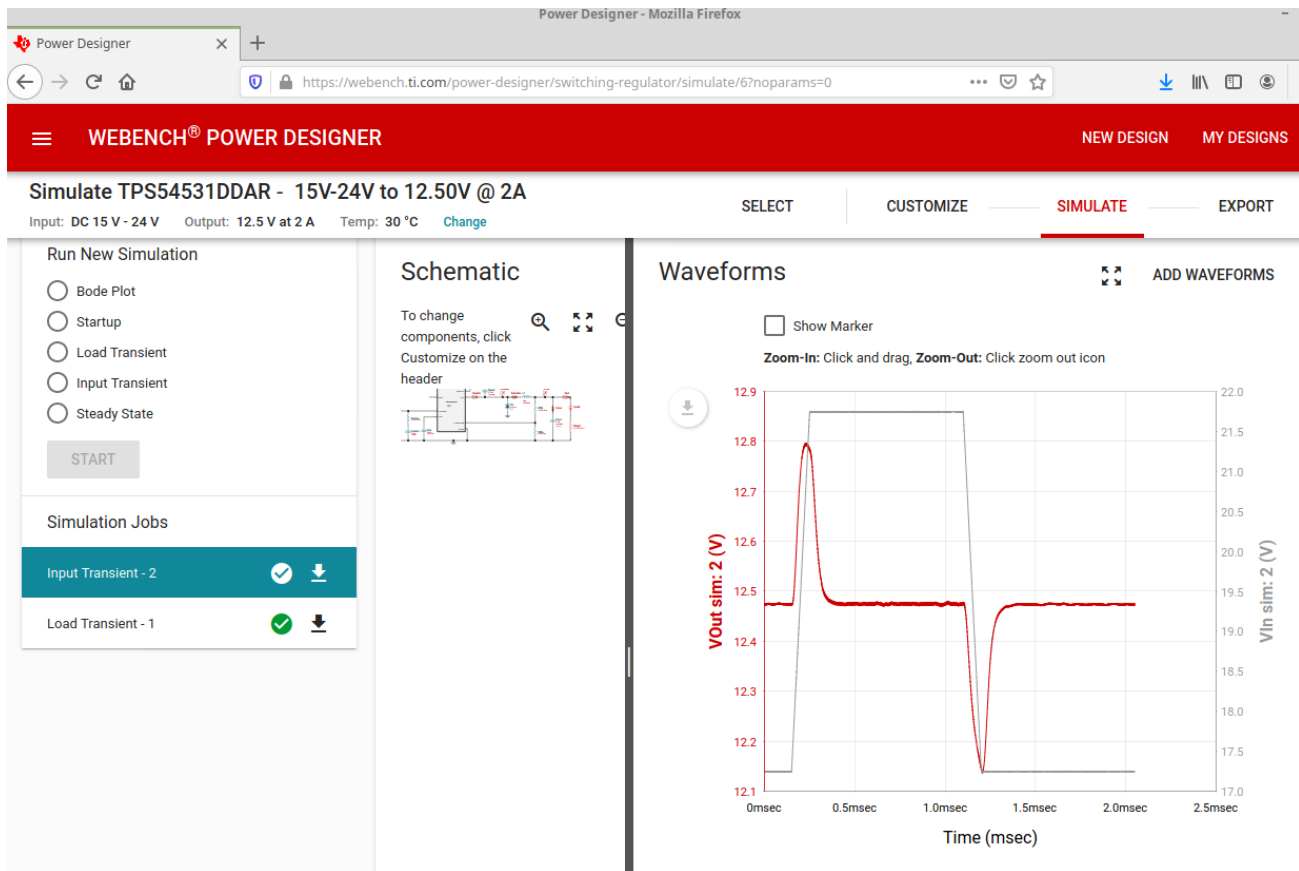


Рисунок 16. Реакция преобразователя на изменение входного напряжения

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer x +

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/simulate/6?noparams=0

WEBENCH® POWER DESIGNER NEW DESIGN MY DESIGNS

### Simulate TPS54531DDAR - 15V-24V to 12.50V @ 2A

Input: DC 15 V - 24 V Output: 12.5 V at 2 A Temp: 30 °C [Change](#)

SELECT CUSTOMIZE **SIMULATE** EXPORT

#### Run New Simulation

- Bode Plot
- Startup
- Load Transient
- Input Transient
- Steady State

START

#### Simulation Jobs

Input Transient - 2	✓	↓
Load Transient - 1	✓	↓

#### Schematic

To change components, click Customize on the header

#### Waveforms

ADD WAVEFORMS

Открытие «WBDesign6\_Input Transient-2.pdf»

Вы собираетесь открыть:

- WBDesign6\_Input Transient-2.pdf

являющийся: Формат переносимых документов (PDF) (23 из blob)

Как Firefox следует обработать этот файл?

- Открыть с помощью Firefox
- Открыть в
- Сохранить файл

Отмена OK

Рисунок 17. Сохранение результатов исследования в файл

Power Designer - Mozilla Firefox

Power Designer x +

https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/simulate/6?noparams=0

WEBENCH® POWER DESIGNER NEW DESIGN

Simulate TPS54531DDAR - 15V-24V to 12.50V @ 2A

Input: DC 15 V - 24 V Output: 12.5 V at 2 A Temp: 30 °C [Change](#) SELECT CUSTOMIZE **SIMULATE**

Simulations ←

Run New Simulation

- Bode Plot
- Startup
- Load Transient
- Input Transient
- Steady State

**START**


Simulation Jobs

Input Transient - 2	✓	↓
Load Transient - 1	✓	↓

Steady State

Schematic

To change components, click Customize on the header



Waveforms

Some simulations may take up to 15 minutes.

Рисунок 18. Выбор исследования пульсаций **Steady State** **START**

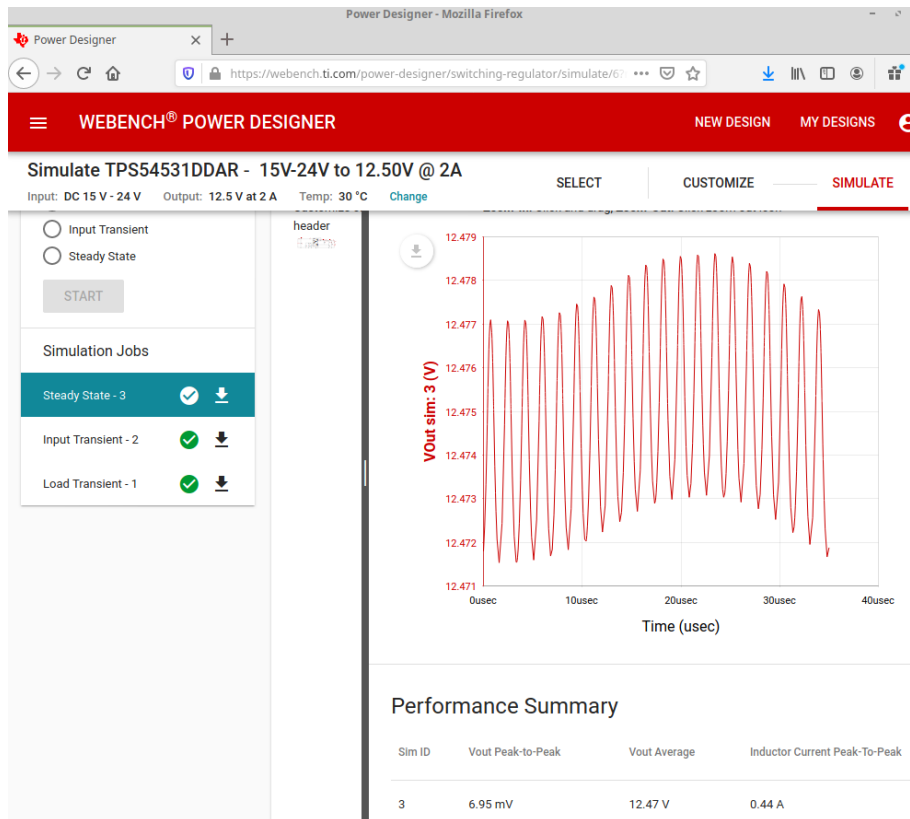


Рисунок 19. Пульсации выходного напряжения



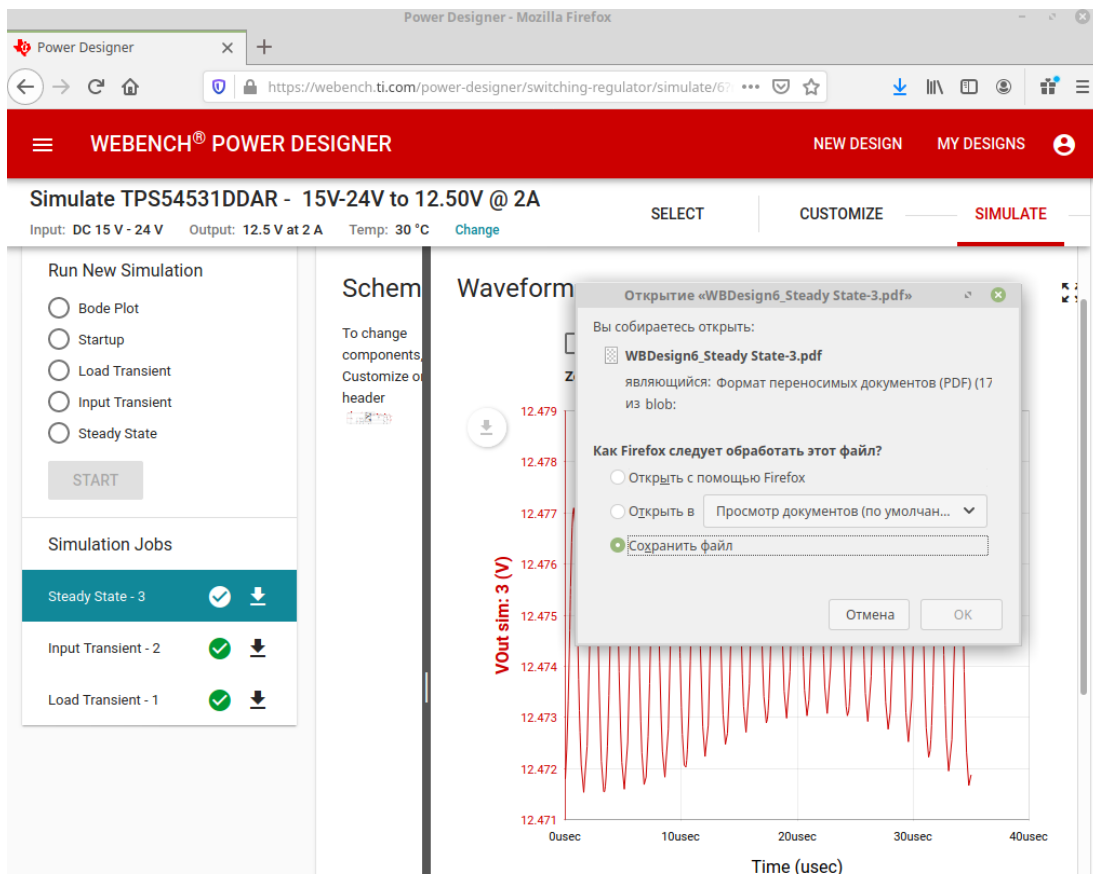


Рисунок 20. Сохранение результатов исследования в файл

## 5. Обработка результатов

Обозначьте  $I_{out\ sim} = I_n$ ,  $V_{out\ sim} = U_n$ , заполните Таблицу 1

Для получения значений  $I_n$  и  $U_n$  приложите горизонтальную линейку к графику реакции преобразователя напряжения на рост выходного тока (рис. 12) и поставьте в соответствие величинам напряжения на левой вертикальной оси значения величин тока на правой вертикальной оси. Зелёные цифры в таблицах и формулах приведены в качестве примера.

Таблица 1.

$I_n$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
$U_n$	11,6	11,8	12,0	12,2	12,4	12,6	12,8	13,0	13,2	13,4	

Постройте график  $U_n = f(I_n)$  (образец на рис. 21 - например, по методичке Крюков А.Н. Построение графиков в одних осях в Calc № 7203).

Рассчитайте значение внутреннего сопротивления стабилизатора напряжения по формуле

$$R_i = \frac{U_{n\ max} - U_{n\ min}}{I_{n\ max} - I_{n\ min}} = \frac{13,4 - 11,6\ В}{2,0 - 0,2\ А} = 1\ Ом$$

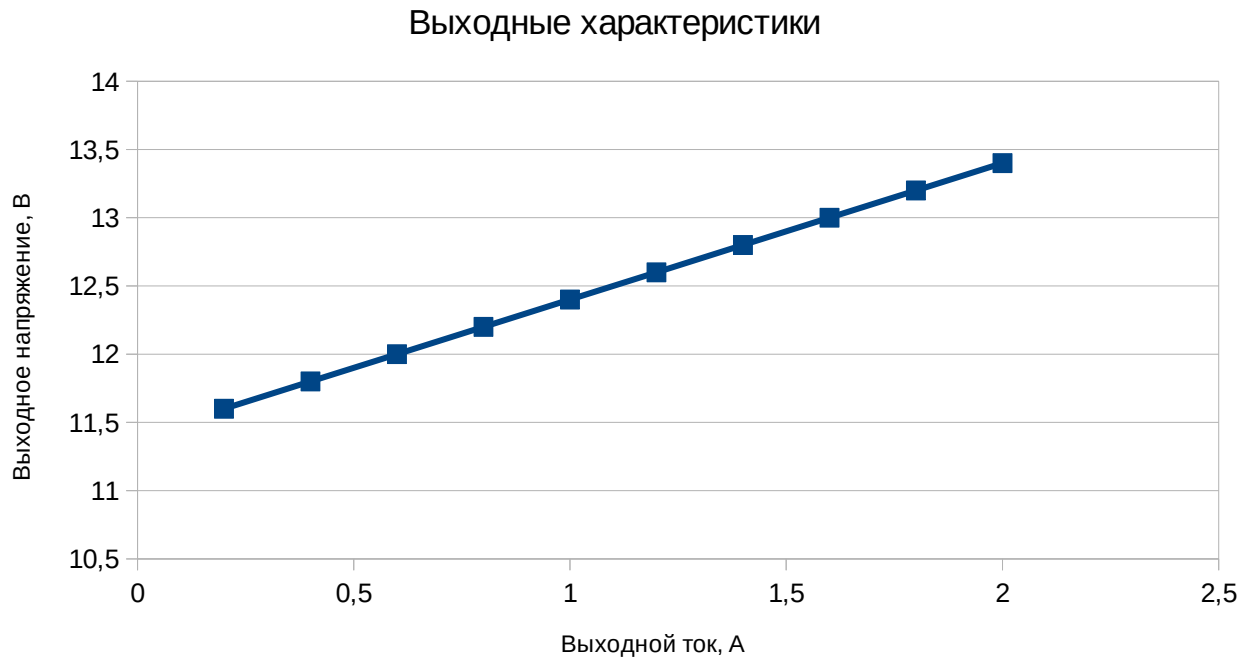


Рисунок 21. Реакция преобразователя на изменение выходного тока

Обозначьте  $V_{in\ sim} = E_0$ ,  $V_{Out\ sim} = U_H$ , по графику реакции преобразователя на изменение входного напряжения (как на рис. 16), приложив горизонтальную линейку, **заполните** таблицу 2

Таблица 2.

$E_0$	17,2	17,5	18,0	18,5	19,0	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0
$U_H$	12,14	12,20	12,25	12,34	12,43	12,56	12,65	12,74	12,8	12,9

Постройте график  $U_H = f(E_0)$  (образец на рис. 22 ).

Рассчитайте значение коэффициента стабилизации по формуле

$$K_{ст} = \frac{(E_{0\ max} - E_{0\ min}) * (U_{H\ max} + U_{H\ min})}{(U_{H\ max} - U_{H\ min}) * (E_{0\ max} + E_{0\ min})} = \frac{(22,0 - 17,2) * (12,9 + 12,14)}{(12,9 - 12,14) * (22,0 + 17,2)} =$$

$$= 3,36 \text{ раза}$$

### Выходные характеристики

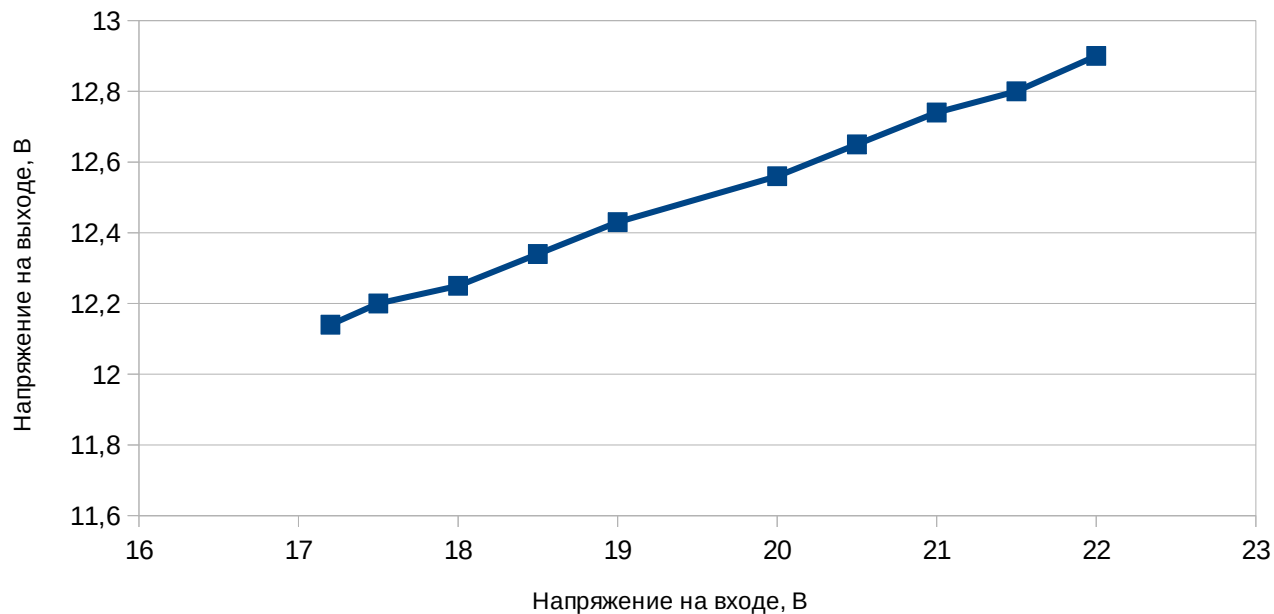


Рисунок 22. Реакция преобразователя на изменение входного напряжения.

Зная принципы действия преобразователя напряжения, в выводах:

1. Поясните взаимосвязь величин выходного тока  $I_H$  и выходного напряжения  $U_H$ .
2. Поясните взаимосвязь величин выходного напряжения  $U_H$  и входного напряжения  $E_0$ .

### **Выводы**

1. При увеличении выходного тока  $I_H$  выходное напряжение  $U_H$
2. При увеличении входного напряжения  $E_0$  выходное напряжение  $U_H$
3. Внутреннее сопротивление  $R_i$  равно  $1 \text{ Ом}$
4. Коэффициент стабилизации  $K_{ст}$  равен  $3,36$