



# Иккиламчи электр энергия манбасини tadqiq qilish va ishlab chiqish

Shavkat E. Begmatov

PhD, prof.v.b., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; [shavkatbegmatov60@gmail.com](mailto:shavkatbegmatov60@gmail.com)  
<http://orcid.org/0000-0002-1528-0098>

**Dolzarblik:** elektrotexnikaning dolzarb vazifalaridan biri elektr energiyasining nostandart iste'molchilari uchun yuqori samarali ikkilamchi energiya manbalarini tadqiq qilish va ishlab chiqishdir. Ushbu muammoni hal qilish uchun maqolada magnit-yarim o'tkazgichli o'zgartgichlar bilan birlashgan ferrozonans elektr zanjirlar tuzulishi asosidagi, quvvati rostlanuvchah ikkilamchi elektr manbasini ishlab chiqish tadqiq qilingan. Tadqiqot natijasida ishlab chiqilgan ikkilamchi quvvat manbasi yuqori elektr texnik ko'rsatkichlari bilan farq qiladi.

**Maqsad:** nostandart elektr energiya iste'molchilari uchun, yuqori elektr texnik ko'rsatkichlari va energiya samaradorligi bilan ajralib turadigan, quvvati rostlanuvchi ikkilamchi elektr energiya manbasini ishlab chiqishdan iborat.

**Usullar:** ikkilamchi quvvat manbasi chiqishidagi to'g'rilangan kuchlanish va tokning o'rtacha qiymatini funktsional o'zgartgich orqali barqarorlash oraligini kengaytirish uchun chastota-impuls modulyatsiyasi, o'zaklar va transistor kalitlarning manbaning sifat ko'rsatkichlariga ta'sirini o'rganish uchun, o'zaklar dinamik gisterzis sirtmog'ning magnitsizlanish egri chizigini approksimatsiyalash va manbaning statik xarakteristikalarini qurishning grafik-analitik usullari qollanilgan.

**Natijalar:** o'zaklar magnitsizlanish egri chizigini approksimatsiyalash usulidan kelib chiqqan yangi analitik tenglamalar o'zaklardagi elektromagnit induksiyaning, ikkilamchi quvvat manbasi chiqishidagi to'g'rilangan tokning va quvvatning barqaror oraligining o'rtacha qiymatini etarli darajada aniq hisoblaydi. Manba statik xarakteristikalarini qurishning grafik-analitik usuli ishlab chiqildi va quvvat, barqarorlik va samaradorlik koeffitsientlari yuqori bo'lgan ikkilamchi elektr energiya manbasi yaratilishi bilan izohlandi.

**Kalit so'zlar:** ikkilamchi elektr energiya manbasi, amplitudali va chastotali impuls modulyatsiyasi, gisterzis sirtmog'i, approksimatsiya, statik xarakteristikalar, kuchlanish invertori, funktsional o'zgartgich, ferrozonans zanjir.

## Исследование и разработка вторичного источника электроэнергии

Шавкат Э. Бегматов

PhD, и.о.проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [shavkatbegmatov60@gmail.com](mailto:shavkatbegmatov60@gmail.com) <http://orcid.org/0000-0002-1528-0098>

**Актуальность:** одной из актуальных задач электротехники является исследование и разработка высокоэффективных вторичных источников энергии для нестандартных потребителей. Для решения этой задачи исследуется разработка регулируемого вторичного источника питания на основе структуры феррозонансных электрических цепей в сочетании с магнитно-полупроводниковыми преобразователями. Разработанный в результате исследований вторичный источник питания отличается высокими электротехническими показателями.

**Цель:** заключается в разработке для нестандартных потребителей электроэнергии, вторичного источника электрической энергии с регулируемой мощностью, характеризующийся высокими электротехническими показателями и энергоэффективностью.

**Методы:** при исследованиях и разработке вторичного источника электропитания были применены методы частотно-импульсной модуляции с функциональным преобразователем для регулирования диапазона стабилизации среднего значения выпрямленного напряжения и тока на выходе источника электропитания. Методом аппроксимации размагничивания динамической петли гистерезиса сердечников, исследованы влияние сердечников и транзисторных ключей на качественные показатели источника. Графо-аналитическим методом построены статические характеристики источника электропитания.

**Результаты:** полученные методом аппроксимации кривой размагничивания петли гистерезиса сердечников новые аналитические уравнения достаточно точно рассчитывают электромагнитную индукцию в сердечниках, среднее значение выпрямленного тока и мощности на выходе, коэффициент полезного действия вторичного источника питания, а также частоту регулирования функционального преобразователя. Разработан графо-аналитический метод построения статических характеристик вторичного источника электрической энергии большой мощности, высокой стабильности и большим КПД.

**For citation:** Begmatov Sh.E.

Research and development of secondary electricity source. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2024, no. 3, pp. 84-93.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14032791>

Received: 10.09.2024

Revised: 20.09.2024

Accepted: 21.10.2024

Published: 02.11.2024

**Copyright:** © Shavkat E. Begmatov, 2024. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



**Ключевые слова:** вторичный источник электрической энергии, амплитудно- и частотно-импульсная модуляция, петля гистерезиса, аппроксимация, статические характеристики, инвертор напряжения, функциональный преобразователь, феррорезонансная цепь.

## Research and development of secondary electricity source

Shavkat E. Begmatov

PhD, acting prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [shavkatbegmatov60@gmail.com](mailto:shavkatbegmatov60@gmail.com)  
<http://orcid.org/0000-0002-1528-0098>

**Relevance:** one of the urgent tasks of electrical engineering is the research and development of highly efficient secondary energy sources for non-standard consumers of electric power. To solve this problem, the development of a regulated secondary power source based on the structure of ferroresonant electric circuits in combination with magnetic semiconductor converters is being investigated. The secondary power source developed as a result of the research is distinguished by high electrical performance.

**Aim:** consists in developing for non-standard consumers of electrical energy, a secondary source of electrical energy with adjustable power, characterized by high electrical performance and energy efficiency.

**Methods:** in the research and development of the secondary power source, methods of frequency-pulse modulation with a functional converter were used to regulate the stabilization range of the average value of the rectified voltage and current at the output of the power source. The effect of cores and transistor switches on the quality indicators of the source was investigated using the method of approximating the demagnetization of the dynamic hysteresis loop of the cores. The static characteristics of the power source were constructed using the graph-analytical method.

**Results:** the new analytical equations obtained by the method of approximation of the demagnetization curve of the hysteresis loop of the cores calculate the electromagnetic induction in the cores, the average value of the rectified current and output power, the efficiency of the secondary power source, and also the frequency of regulation of the functional converter by a sufficiently accurate method. A graph-analytical method for constructing static characteristics and a secondary source of electrical energy with high power, stability and efficiency has been developed.

**Keywords:** secondary source of electrical energy, amplitude and frequency pulse modulation, hysteresis loop, approximation, static characteristics, voltage inverter, functional converter, ferroresonant circuit.

### 1. Введение (Introduction)

Исследование и разработка высокоэффективных вторичных источников электропитания (ВИЭП) для нестандартных потребителей электрической энергии с различными диапазонами мощности и частоты, остается одной из актуальных задач электротехники. Использование для этих целей электрических цепей феррорезонансной структуры при сочетании с преимуществами магнитно-полупроводниковых преобразователей (МПП) оправданы практикой. Обеспечивая достаточно высокий коэффициент полезного действия (КПД), простоту и надежность, объединение феррорезонансных цепей (ФЦ) с МПП не требует дополнительных устройств формирования сигнала по синусоиде, что позволяет максимально упростить силовой блок и систему управления, увеличить энергоотдачу на единицы массы и объема [4-7].

### 2. Методы и материалы (Methods and materials)

Предлагается структурная схема (рис.1) ВИЭП построенного на основе МПП и ФЦ, в котором входной величиной является напряжение переменного тока, а выходными величинами - средние выпрямленные значения напряжения и тока [10,15].

В структурной схеме ВИЭП, инвертор напряжения (ИН) преобразует входное напряжение в переменное методом амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), в то время как функциональный преобразователь (ФП) - частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и регулирует диапазоны стабилизации средних выпрямленные значения напряжения и тока. Эффект стабилизации напряжения и тока достигается на ФЦ за счет явлений феррорезонансов напряжений и токов. ИН (АИМ) и ФП (ЧИМ) построены на транзисторах с N-P-N переходами, которые работают только в режиме переключения, а также на магнитных сердечниках, работающих в режиме насыщения [8,13].

Исследование показывает, что динамические свойства сердечников и параметры транзисторов во многом определяют точность стабилизации, параметрическую надежность и стабильность ВИЭП. Поэтому, для изучения влияния свойств сердечников и параметров транзисторов на статические характеристики ВИЭП примем следующие допущения:

- Входное напряжение является источником постоянного тока;
- Обмоточные данные, геометрические размеры сердечников и их магнитные характеристики идентичны, нагрузка активная;

- Индуктивное сопротивление рабочей обмотки насыщенного сердечника существенно меньше сопротивления нагрузки и им можно пренебречь;
- Статическая петля гистерезиса сердечников близка к прямоугольной. Индуктивность рассеяния обмоток равна нулю;
- Транзисторные ключи идеальны.

С целью изучения влияния свойств сердечников на качественные показатели ВИЭП проведем аппроксимацию динамической петли гистерезиса сердечников.

Как известно, в общем виде, связь между индукцией и напряженностью поля сердечников описывается дифференциальным уравнением высокого порядка [1-3]:

$$B = \varphi \left( H, \frac{dH}{dt}, \dots, B, \frac{dB}{dt}, \frac{d^2 B}{dt^2}, \dots \right). \quad (1)$$

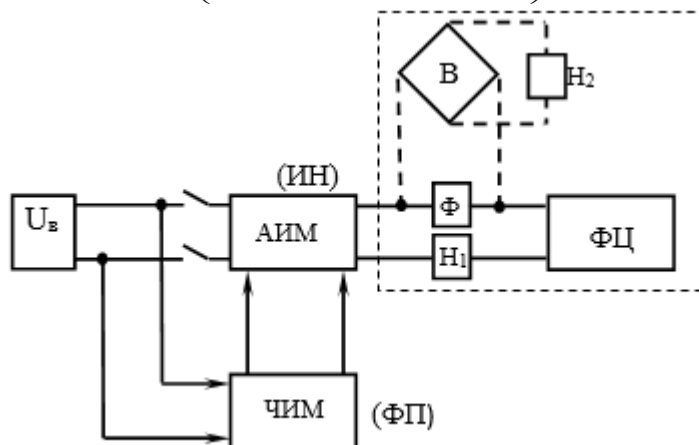


Рис. 1. Структурная схема ВИЭП

Fig. 1. Structural diagram

Если при первом приближении пренебречь производными высших порядков, тогда уравнение (1) принимает упрощенный вид:

$$\frac{dB}{dt} - F(H, B) = 0.$$

(2)

Аналитическое выражение уравнения (2) с использованием динамической кривой размагничивания (ДКР) сердечников имеет следующий вид:

$$\frac{dB}{d\tau} = \frac{\mu_{\text{э}}}{\pi} (H - H_c).$$

(3)

где  $\mu_{\text{э}}$  – эквивалентная проницаемость сердечника, определяемая по ДКР;  $H_c$  – коэрцитивная сила, определяемая по статической петле гистерезиса;  $\tau = \omega t$ ;  $\omega$  – круговая частота перемагничивания сердечника.

Как показано в [3-4] уравнение (3) описывает лишь процесс намагничивания сердечников, а для процесса размагничивания оно примет следующий вид:

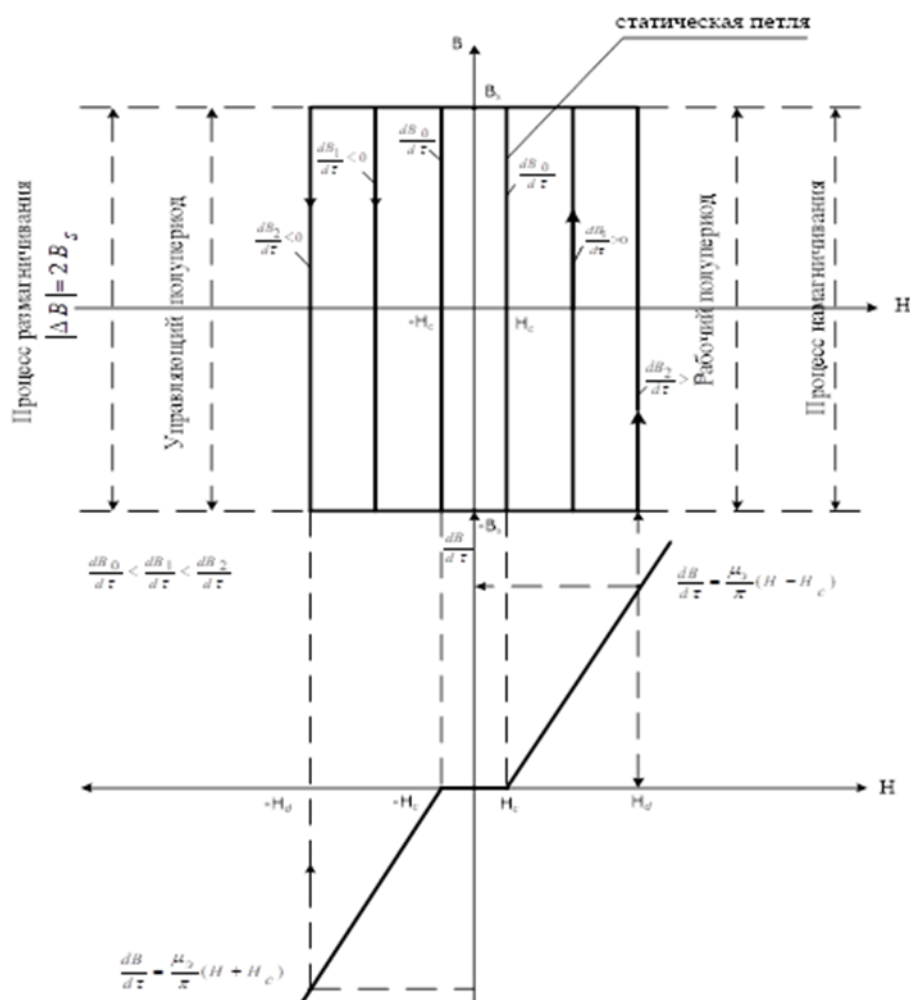
$$\frac{dB}{d\tau} = \frac{\mu_{\text{э}}}{\pi} (H + H_c). \quad (4)$$

Обобщая уравнения (3) и (4), получаем:

$$\frac{dB}{d\tau} = \frac{\mu_{\text{э}}}{\pi} (H \mp H_c). \quad (5)$$

где знак “-“ соответствует увеличению индукции в сердечнике, а “+” – ее уменьшению. С учетом (5), на рис.2. приведено графическое изображение аппроксимации динамической петли гистерезиса сердечника [8-10].

В источнике электропитания сердечники ИН и ФП работают в режиме насыщения, т.е. изменение индукции за полупериод частоты преобразования  $|\Delta B| \geq 2B_s$ , где  $B_s$  – индукция насыщения сердечника. При этом напряжение входного сигнала  $U_{\text{вх}}$  является и размагничивающим и намагничивающим фактором для ферромагнитных сердечников.

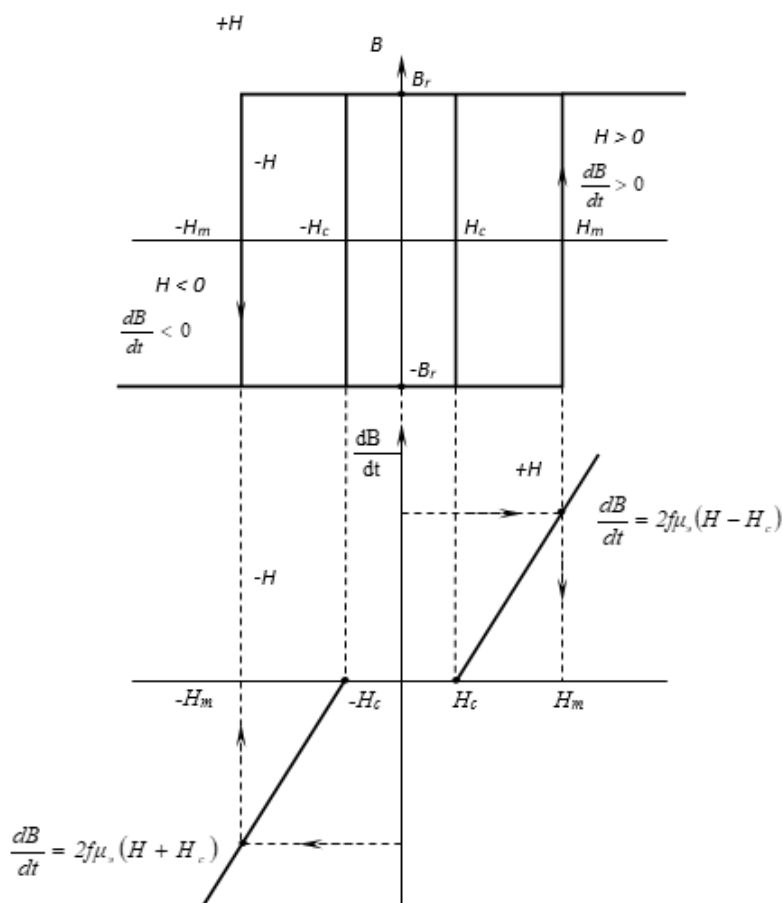


**Рис.2.** Аппроксимация динамической петли гистерезиса сердечников  
**Fig.2.** Approximation of the dynamic hysteresis loop of cores

В зависимости от состояния транзисторных ключей на ИН и ФП в источнике электропитания возможны следующие состояния сердечников (рис.2):

- состояние намагничивания: транзисторы ИН открыты, а транзисторы ФП закрыты, т.е. для сердечника ИН рабочий, а для сердечника ФП – управляющий полупериоды;
- состояние размагничивания: транзисторы ИН закрыты, а транзисторы ФП открыты т.е. сердечники ИН и ФП меняются режимами работы по отношению к состоянию намагничивания. Частота переключения транзисторов ФП определяется частотой переменного выходного напряжения ИН [3,8,14].

Как известно, на явлениях феррорезонанса в нелинейных электрических цепях разрабатываются ферромагнитные стабилизаторы напряжения и тока [17-20]. Учитывая, что в структурной схеме (рис.1) ФЦ работает в режиме феррорезонанса, важным фактором является анализ электромагнитной совместимости между ФЦ и МПП (ИН и ФП). Для этого проведем анализ установившегося режима работы ФЦ с допущениями, что транзисторные ключи МПП идеальны, характеристика намагничивания нелинейной индуктивности (НИ) ( $L_0$ ) ФЦ изменяется по прямоугольной петле гистерезиса, а инвертируемое ИН напряжение на входе ФЦ прямоугольное переменное. Последнее равносильно перемагничиванию сердечника НИ ( $L_0$ ) под действием напряжения постоянного тока с его периодической коммутацией, что и было использовано при разработке схемы замещения ФЦ (рис.4.). Применительно к ВИЭП представляет интерес интерпретация уравнения (2) с использованием ДКР для анализа ФЦ со встроенным ФП [14-16]. С учетом выше принятых допущений аппроксимация динамической петли гистерезиса с помощью динамической кривой размагничивания сердечника НИ ( $L_0$ ) представлена на рис.3.

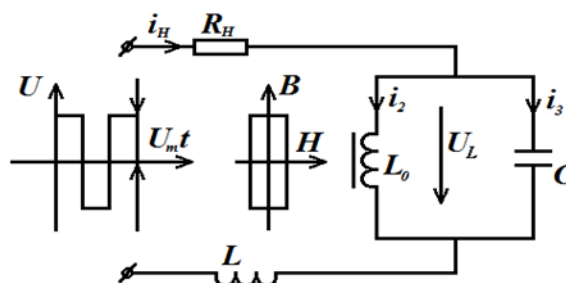


**Рис.3.** Динамическая петля гистерезиса сердечника НИ ( $L_0$ )

**Fig.3.** Dynamic hysteresis loop of the NI core

Электромагнитный баланс в схеме замещения ФЦ (рис.4) описывается уравнениями вида:

$$\left. \begin{aligned} i_H &= i_2 + i_3 ; \\ i_2 &= \frac{Hl}{\omega} ; \\ i_3 &= C \frac{du_L}{dt} = C\omega S \frac{d^2B}{dt^2} ; \\ U &= R_H i_H + L \frac{di_H}{dt} + \omega S \frac{dB}{dt} . \end{aligned} \right\} \quad (6)$$



**Рис.4.** Схема замещения ФЦ

**Fig.4.** FC substitution diagram

С учетом (5) для процесса перемагничивания сердечника ( $L_0$ ) из системы (6) с некоторым преобразованием получим уравнение, являющееся линейным неоднородным дифференциальным уравнением:

$$u = L\omega CS \frac{d^2t}{dt^2} + \left( R_H C \omega S + \frac{Ll}{2f\mu_3\omega} \right) \frac{d^2t}{dt^2} + \left( \omega S + \frac{R_H l}{2f\mu_3\omega} \right) \frac{dB}{dt} \pm \frac{H_c l R_H}{\omega} . \quad (7)$$

Дифференцированием (7) переходим к характеристическому уравнению:



$$L\omega SCP^2 + \left(R_H C\omega S + \frac{Ll}{2f\mu_3\omega}\right)P + \omega S + \frac{R_H l}{2f\mu_3\omega} = 0. \quad (8)$$

Если принять условие:

$$D = \left(R_H C\omega S + \frac{Ll}{2f\mu_3\omega}\right)^2 - 4\left(LC\omega^2 S^2 + \frac{4LCSR_H}{2f\mu_3}\right) > 0, \quad (9)$$

то магнитная индукция в ферромагнитном материале вплоть до 5-ой гармоники определяется выражением:

$$B = C_1 e^{-P_3 t} + C_2 e^{-P_4 t} + B_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + B_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + B_{5m} \sin(5\omega t + \varphi_5) + C_0; \quad (10)$$

где  $P_1 = P_2 = 0$ .  $P_3$  и  $P_4$  – действительные корни;  $C_0; C_1; C_2$  – постоянные интегрирования уравнения (8).

Частное решение уравнения (7) проведем методом гармонического баланса с принятыми допущениями установившегося режима ФЦ. Принимая, что на входе ФЦ – прямоугольное переменное напряжение с амплитудой  $U_m$  и разложив его в ряд Фурье, получим:

$$u(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t \right). \quad (11)$$

Тогда частное решение уравнения (7) можно представить в виде:

$$B = B_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + B_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + B_{5m} \sin(5\omega t + \varphi_5); \quad (12)$$

где 1,3 и 5-гармоники магнитной индукции равны:

$$\left. \begin{aligned} B_{1m} &= \frac{\frac{4U_m}{\pi}}{\left(\omega^2 R_H C\omega S + \frac{\omega^2 Ll}{2f\mu_3\omega}\right) \cos \varphi_1 + \left(\omega^2 LC\omega S - \omega S - \frac{R_H l}{2f\mu_3\omega}\right) \sin \varphi_1}; \\ B_{3m} &= \frac{\frac{4U_m}{\pi}}{\left(27\omega^2 R_H C\omega S + \frac{27\omega^2 Ll}{2f\mu_3\omega}\right) \cos \varphi_3 + \left(81\omega^2 LC\omega S - 9\omega S - \frac{9R_H l}{2f\mu_3\omega}\right) \sin \varphi_3}; \\ B_{5m} &= \frac{\frac{4U_m}{\pi}}{\left(125\omega^2 R_H C\omega S + \frac{125\omega^2 Ll}{2f\mu_3\omega}\right) \cos \varphi_5 + \left(625\omega^2 LC\omega S - 25\omega S - \frac{25R_H l}{2f\mu_3\omega}\right) \sin \varphi_5}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{где } \varphi_1 = \arctg \frac{\omega^2 LC\omega S - \omega S - \frac{R_H l}{2f\mu_3\omega}}{\omega^2 R_H C\omega S + \frac{\omega^2 Ll}{2f\mu_3\omega}}; \quad \varphi_3 = \arctg \frac{81\omega^2 LC\omega S - 9\omega S - \frac{9R_H l}{2f\mu_3\omega}}{27\omega^2 R_H C\omega S + \frac{27\omega^2 Ll}{2f\mu_3\omega}};$$

$$\varphi_5 = \arctg \frac{625\omega^2 LC\omega S - 25\omega S - \frac{25R_H l}{2f\mu_3\omega}}{125\omega^2 R_H C\omega S + \frac{125\omega^2 Ll}{2f\mu_3\omega}}.$$

Постоянные интегрирования (10) определим из следующих начальных условий:

1. при  $t = 0$  в сердечнике имеется остаточная индукция  $B_0$ ; 2). при  $t = \frac{\alpha}{\omega}$ ,  $B = B_r$  где  $\alpha$  – угол насыщения сердечника,  $B_r$  – индукция насыщения; 3). при  $t = \frac{\alpha}{\omega}$ ,  $\frac{dB}{dt} = 0$ .

С учетом начальных условий получим:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{P_4 e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} (B_0 - B_r - K + X) + Y (e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} - 1)}{P_3 e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} (e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} - 1) - P_4 e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} (e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} - 1)}; \\ C_2 &= \frac{P_3 e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} (B_r - B_0 - K + X) + Y (e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} - 1)}{P_3 e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} (e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} - 1) - P_4 e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} (e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} - 1)}; \\ C_0 &= \frac{(B_0 - K) \left| e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} (P_3 - P_4) \right| + (B_r - X) \left( P_4 e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} - P_3 e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} \right) + Y \left( e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} - e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} \right)}{P_3 e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} (e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} - 1) - P_4 e^{-P_4 \frac{\alpha}{\omega}} \times (e^{-P_3 \frac{\alpha}{\omega}} - 1)}; \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $K = B_{1m} \sin \varphi_1 + B_{3m} \sin \varphi_3 + B_{5m} \sin \varphi_5$ ;  $X = B_{1m} \sin(\alpha + \varphi_1) + B_{3m} \sin(\alpha + \varphi_3) + B_{5m} \sin(\alpha + \varphi_5)$ ;  $Y = B_{1m} \omega \cos(\alpha + \varphi_1) + 3B_{3m} \omega \cos(3\alpha + \varphi_3) + 5B_{5m} \omega \cos(5\alpha + \varphi_5)$ .

Таким образом, с учетом (13) и (14) из уравнения (10) определяется закон изменения индукции в сердечнике ( $L_0$ ).

### 3. Результаты (Results)

В установившемся режиме работы ФЦ, ток на нагрузке определим из уравнения:

$$i_H = i_2 + i_3 \quad \text{или} \quad i_H = i_{L_0} + i_C ; \quad (15)$$

$$\text{где} \quad \left. \begin{aligned} i_{L_0} &= \frac{Hl}{\omega} = \left( \frac{dB}{dt} \frac{1}{2f\mu_3} - H_C \right) \frac{l}{\omega} ; \\ i_C &= \omega S \frac{d^2 B}{dt^2} . \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Подставив (16) в (15) получим уравнение для определения тока на нагрузке:

$$i_H = \left( \frac{dB}{dt} \frac{1}{2f\mu_3} - H_C \right) \frac{l}{\omega} + \omega S \frac{d^2 B}{dt^2} . \quad (17)$$

Проинтегрировав (17) за полупериод частоты преобразования, получим уравнение для определения среднего значения тока на нагрузке:

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{\alpha}{\omega}} i_H dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{\alpha}{\omega}} \left[ \left( \frac{dB}{dt} \frac{1}{2f\mu_3} - H_C \right) \frac{l}{\omega} + \omega S \frac{d^2 B}{dt^2} \right] dt ; \quad (18)$$

$$\text{откуда} \quad I_{cp} = \frac{2}{T} f \omega S C A + \frac{l\mu}{\omega\pi} \left( \frac{B_r - B_0}{\mu_3} - H_C \right) ; \quad (19)$$

где  $A = B_{1m} \cos \varphi_1 + 3B_{3m} \cos \varphi_3 + 5B_{5m} \cos \varphi_5$ .

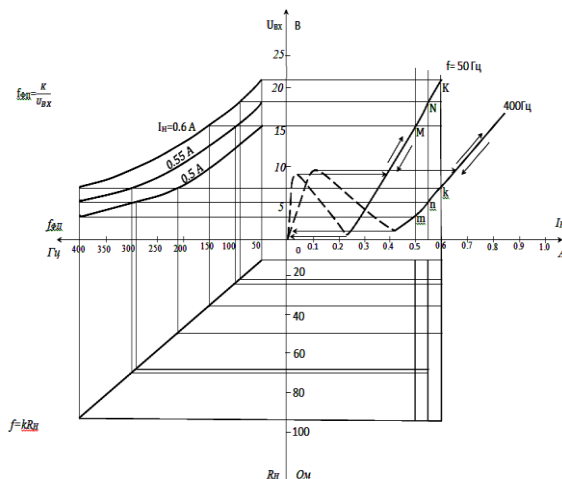
Из выражения (19) найдем частоту преобразования ФП, которая обеспечивает стабилизацию выходного тока на ФЦ:

$$f_{ФП} = \frac{1}{2\omega C S A} \left( I_{cp} - \frac{(B_r - B_0 - H_C) l \mu}{\omega \pi \mu_3} \right). \quad (20)$$

Как видно из (20), среднее значение тока нагрузки зависит от параметров ( $L_0$ ), значений ёмкости и частоты ФП, которые управляют диапазоном стабилизации тока ФЦ.

На рис.5 представлены статические характеристики ВИЭП, построенные на основе уравнений (19) и (20) графоаналитическим способом. Исходной является характеристика  $U_{ex} = F(I_H)$  последовательно-параллельной ФЦ, при двух значениях частоты ФП: 50 и 400 Гц.

Следует отметить, что с увеличением частоты ФП она деформируется, и устойчивый участок характеристики получается более горизонтальным. Проведя из этих характеристик горизонтальные линии, получаем  $U_{ex} = F(f_{ФП})$ , которая представляет собой гиперболическую функцию [19-22].



**Рис.5.** Графо-аналитический метод построения статических характеристик ВИЭП  
**Fig.5.** Graph-analytical method for constructing static characteristics of a SPS

Имея зависимость  $U_{ex} = F(f_{ФП})$ , можно построить нагрузочную характеристику  $I_H = F(R_H)$ , которая получается строго жесткой, т.е. с изменением величины нагрузки, ток нагрузки практически остаётся неизменным. При этом, изменяя частоту ФП (50, 400 Гц), можно регулировать величину тока нагрузки, т.е. можно получить плавно регулируемый источник тока. Заключительная характеристика, представляющая собой закон изменения частоты ФП в зависимости от величины нагрузки  $f_{ФП} = F(R_H)$  получается линейной зависимостью.

Мгновенная и активная мощности ВИЭП на нагрузке соответственно равны:

$$p = i_1^2 R_H = [I_{1m} \sin(\omega t + \alpha) - (\frac{b}{2} \Psi_{1m}^3 - \frac{b}{36L\omega^2 C} \Psi_m^3) \sin 3\omega t]^2 R_H; \quad (21)$$

$$P_H = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{I_{1m}^2}{2} R_H - \frac{R_H \Psi_m^6}{2} (\frac{b}{2} - \frac{b}{36L\omega^2 C})^2; \quad (22)$$

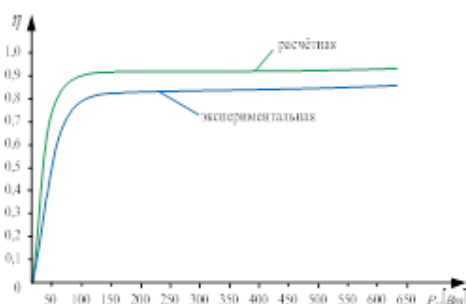
КПД источника определим из выражения:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{и}} = \frac{\frac{I_{1m}^2}{2} R_H - \frac{R_H \Psi_m^6}{2} (\frac{b}{2} - \frac{b}{36L\omega^2 C})^2}{\frac{U_m}{\sqrt{2}} [\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} \sin \alpha]}. \quad (23)$$

#### 4. Обсуждение (Discussion)

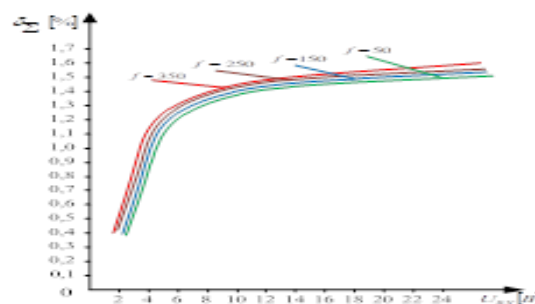
На рис.6 представлены расчетные и экспериментальные характеристики КПД ВИЭП от активной мощности нагрузки  $\eta = F(P_H)$ , на основе уравнений (22) и (23). Очевидно, что при широком диапазоне изменения мощности нагрузки, КПД находится в пределах  $\eta = 0,8 \div 0,9$ .

Зависимость нестабильности от входного напряжения при различных значениях частоты (рис.7.) не превышает 0,5-1,6%. Коэффициент стабилизации находится в пределах 90-95%,



**Рис.6.** Расчетные и экспериментальные зависимости КПД ВИЭП от мощности нагрузки

**Fig. 6.** Calculated and experimental dependences of the efficiency of the SPS on the load power



**Рис.7.** Зависимость нестабильности ВИЭП от входного напряжения при различных значениях частоты ФП

**Fig. 7.** Dependence of instability of the SPS on the input voltage at different values of the frequency of the functional converter

#### 5. Заключение (Conclusions)

На основе вышеприведённых результатов можно сделать следующие выводы и заключения:

1. Предложенная структурная схема (рис.1) позволяет создавать регулируемый ВИЭП с высокими электротехническими показателями.

2. Проведена аппроксимация ДКР сердечников МПП (рис.2) и НИ (рис.3) и получены аналитические выражения для определения динамических электрических и магнитных значений ВИЭП, которые отличаются достаточно высокой точностью и доказывают электромагнитную совместимость МПП с ФЦ.

3. Экспериментальные статические характеристики, построенные графоаналитическим способом (рис.5), наглядно демонстрируют, что ВИЭП обладает почти идеальными свойствами стабилизации тока.

4. Анализ статического режима ВИЭП, с учетом принятых допущений, позволил установить, что среднее значение выходного тока зависит от параметров сердечников и транзисторов, а также частоты ФП.

5. Частота ФП является фактором регулирования уровнем и диапазоном стабилизации тока.

6. По результатам анализа предложена схема регулируемого ВИЭП постоянного тока, отличающаяся простотой схемы, высоким коэффициентом стабилизации, низким коэффициентом нестабильности и повышенным КПД.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники, - М.: Наука, 1974, -717 с.
2. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. - М.:Высшая школа, 1974, - 210 с.
3. Львов Е.Л. Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. -М.: Энергия, 1967, -532 с.
4. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. –Москва: Энергия, 1968, -502 с.





5. Губанов В.В. Стабилизированные полупроводниковые преобразователи в системе с нелинейными резонансными устройствами. -М.: Энергоатомиздат, 1985, -192 с.
6. John Bird. Electrical and Electronic Principles and Technology. London -N York, 2014. 455 p.
7. K.Charles, A.Matthew, N.O.Sadiku. Fundamentals of Electric Circuits. NEW YORK, 2014. -458 p.
8. Абдуллаев Б., Бегматов Ш.Э. Модели нелинейных элементов электрических цепей и систем. Монография. LAP Lambert Academic Publishing RU. Dodo Books. London-Moldova 2023.
9. Vergara Valdes L.A. Development of a technique for detecting and compensating nonlinear dynamic processes in the medium voltage networks of the electrical complexes. Dissertation. Ph.D.: 05.09.03. - Moscow, 2016. – 161 с.
10. Бегматов Ш.Э. Разработка и исследование частотно-управляемых феррорезонансно - полупроводниковых стабилизаторов тока с питанием от источника постоянного напряжения. Диссертация. -Т.: ТашГТУ, 1993.
11. “Dynamic generalized models of nonlinear elements of electric and systems and their application in the theory of energy-saving devices of converter technology” Research and Development Report. State registration number: OT-F2-47. Tashkent 2020. -P.86.
12. Абдуллаев Б., Холбутаева Х.Э., Халманов Д.Х. К вопросу анализа источников погрешностей и повышения точности функционирования электрических цепей и систем // Проблемы энергии и ресурсоброжения. 2014. №1. –С. 238-243.
13. Абдуллаев Б.А., Бегматов Ш.Э., Алимов А.А. Некоторые вопросы анализа частотно-управляемых феррорезонансно-электронных цепей со стабилизирующими свойствами / Тезисы докл. I Всес. Конф. по теорет. электротехнике. Ташкент, 1987. -С. 118.
14. Абдуллаев Б., Бегматов Ш.Э. Применение обобщенной модели к анализу вторичного источника электропитания. //Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Ташкент, 2018, №3-4.
15. Begmatov Sh.E. Secondary power supply with high efficiency. //Vestnik of Tashkent State Technical University, 2018, №2. -С.63-67.
16. Alimov A.A., Nosirova D.A., Akbarov F.A., Muminov Kh.A. To the problem of the calculation capacity of the nonlinear inductance. Journal of critical reviews. ISSN-2394-5125 Vol 7, Issue 15, 2020. doi: [10.31838/jcr.07.15.232](https://doi.org/10.31838/jcr.07.15.232).
17. Sh.E.Begmatov, S.A.Dusmukhamedova and Kh.Holbutaeva. Study of ferro resonance using generalized models of Passive nonlinear elements. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020), 14 December 2020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601115>.
18. Analysis of Ferroresonance in 6-35 kV Electric Networks Including Dynamic Model of Non-Linear inductivity of Power Transformer Shavkat Begmatov, Dilshod Khalmanov, Saidakhon Dusmukhamedova, Elerjan Nabizhonov. Cite as: AIP Conference Proceedings 2552, 040011 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0130666> Published Online: 05 January 2023.
19. Sh.E.Begmatov. Calculation of active power losses taking into account the nonlinear inductance of the voltage transformer //TECHNICAL SCIENCE AND INNOVATION. № 3/2023. 137-144p. Tashkent State Technical University.
20. Begmatov Sh. Research of Ferroresonance in 6-35 kV Electrical Networks Taking Into Account the Dynamic Model of Non-Linear Inductivity of Power Transformer // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT Volume 11, Issue 1, 2023, Pages 273-277 11th International Conference on Applied Innovations in IT, ICAIIT 2023; Koethen; Germany;
21. Begmatov Sh.E., Peysenov M.B. Юқори фойдали иш коэффициентига эга параметрик стабилизаторнинг статик тавсифларини -ҳисоблаш ва қуриш дастури. // Гувохнома. DGU 32471. 2024 й.
22. Begmatov Sh.E., Peysenov M.B., Rismuxamedov S.D. Параметрик стабилизатор чиқиш кучланишининг статик беқарорлик тавсифини ҳисоблаш ва қуриш дастури //Гувохнома. DGU 34684. 2024 й.

## REFERENCES

1. Rosenblat M.A. Magnetic elements of automation and computer technology, - M., "Nauka", 1974, - 717 p. (In Russ.).
2. Milovzorov V.P. Electromagnetic devices of automation.- M., "Higher School", 1974,- 210 p. (In Russ.).
3. Lvov E.L. Magnetic amplifiers in automatic control technology. Moscow:Energy, 1967, 532 p. (In Russ.).
4. Filippov E. Nonlinear electrical engineering. – Moscow, “Energia”, 1968,-502 p. (In Russ.).
5. Gubanov V.V. The stabilized semiconductor converters in system with nonlinear resonant devices: M.: Energoatomizdat, 1985. p. 192. (In Russ.).



6. John Bird. "Electrical and Electronic Principles and Technology" London and New York, 2014.- 455 p.
7. K.Charles, A.Matthew, N.O.Sadiku "Fundamentals of Electric Circuits" NEW YORK, 2014.- 458 p.
8. Abdullaev B., Begmatov Sh.E. Models of nonlinear elements of electrical circuits and systems. Monograph. LAP Lambert Academic Publishing RU. Dodo Books. London-Moldova 2023. (In Russ.).
9. Vergara Valdes L.A. Development of a technique for detecting and compensating nonlinear dynamic processes in the medium voltage networks of the electrical complexes. Dissertation. Ph.D.: 05.09.03. - Moscow, 2016. - 161c.
10. Begmatov Sh.E. Development and research of frequency-controlled ferroresonant semiconductor current stabilizers powered by a constant voltage source. Dissertation. T.: TashSTU, 1993. (In Russ.).
11. "Dynamic generalized models of nonlinear elements of electric and systems and their application in the theory of energy-saving devices of converter technology" Research and Development Report. State registration number: OT-F2-47. Tashkent 2020. -P.86.
12. Abdullaev B., Kholbutaeva H.E., Khalmanov D.Kh. on the issue of analyzing sources of errors and improving the accuracy of functioning of electrical circuits and systems// Journal "Problems of Energy and Resource Fermentation" No. 1. 2014. –P. 238-243. (In Russ.).
13. Abdullaev B.A., Begmatov Sh.E., Alimov A.A. Some issues of analysis of frequency-controlled ferroresonant-electronic targets with stabilizing properties / Abstracts of reports. I All-Union Conference on Theoretical Electrical Engineering. Tashkent, 1987. -P. 118. (In Russ.).
14. Abdullaev B., Begmatov Sh.E. Application of a generalized model to the analysis of a secondary power source.//Problems of energy and resource saving. Tashkent, 2018, No. 3-4. (In Russ.).
15. Begmatov Sh.E. Secondary power supply with high efficiency. // Vestnik of Tashkent State Technical University, 2018, №2. -P.63-67. (In Russ.).
16. Alimov A.A., Nosirova D.A., Akbarov F.A., Muminov Kh.A. To the problem of the calculation capacity of the nonlinear inductance. Journal of critical reviews. ISSN-2394-5125 Vol 7, Issue 15, 2020.doi:[10.31838/jcr.07.15.232](https://doi.org/10.31838/jcr.07.15.232).
17. Sh.E.Begmatov, S.A.Dusmukhamedova and Kh.Holbutaeva. Study of ferro resonance using generalized models of Passive nonlinear elements, Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2020), 14 December 2020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601115>.
18. Analysis of Ferroresonance in 6-35 kV Electric Networks Including Dynamic Model of Non-Linear inductivity of Power Transformer Shavkat Begmatov, Dilshod Khalmanov, Saidakhon Dusmukhamedova, Elerjan Nabizhonov. Cite as: AIP Conference Proceedings 2552, 040011 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0130666> Published Online: 05 January 2023.
19. Sh.E.Begmatov Calculation of active power losses taking into account the nonlinear inductance of the voltage transformer //TECHNICAL SCIENCE AND INNOVATION. № 3/2023. 137-144p. Tashkent State Technical University University.
20. Begmatov Sh. Research of Ferroresonance in 6-35 kV Electrical Networks Taking Into Account the Dynamic Model of Non-Linear Inductivity of Power Transformer // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT, Volume 11, Issue 1, 2023, Pages 273-277 11th International Conference on Applied Innovations in IT, ICAIT 2023; Koethen; Germany; 2023.
21. Begmatov Sh.E., Peysenov MB. "Program for calculation and construction of static characteristics of a parametric stabilizer with a high useful coefficient of operation"// Testimony. DGU 32471. 2024. (In Uzb.).
22. Begmatov Sh.E., Peysenov M.B., Rismukhamedov S.D. "Calculation of static instability description of parametric stabilizer output voltage and Kurysh program" // Guvognoma. DGU 34684. 2024. (In Uzb.).