

Расулов Абдулхай Нарходжаевич, к.т.н., профессор
Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова

ТРЕХФАЗНЫЙ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР ТОКА

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы стабилизации тока трехфазных потребителей, где питающей сеть подключается три однофазных ФСТ по схеме «треугольник» и однофазных стабилизаторы, собранные по схеме «звезда» и питание осуществляется от трехфазной сети с нулевым проводом. Решая системы уравнений, составленной по законам Кирхгофа, принимая аппроксимации кривой намагничивания ферромагнитного элемента степенной функцией получены основные выражение в относительных единицах. Приводятся основных энергетические и эксплуатационные показатели трехфазного ФСТ. Анализ показывает, что несимметрия трехфазного источника не влияет на значение стабилизированного тока, что свойство цепи позволяет использовать её в качестве симметрирующего устройства, обладающего стабилизирующим эффектом, как при изменении величины нагрузки, так и при отклонении питающего напряжения.

Ключевые слова: Феррорезонансный стабилизатор тока, трёхфазная цепь, электроферромагнитный колебательный контур, стабилизация тока, падающий участок вольт-амперной характеристики, аппроксимация кривой намагничивания, метод гармонического баланса, несимметрия питающего напряжения, симметрирующее устройство, коэффициент нелинейных искажений.

Многие технологические процессы и устройства питаются от источника многофазного тока и целесообразным является рассмотрение вопроса создания трёхфазного, трёхфазно-однофазного, двухфазно-однофазного стабилизатора тока на базе электроферромагнитных цепей, амплитудные характеристики которых обладают устойчивым падающим участком. В связи с этим рассматриваются установившиеся режимы различных вариантов схем стабилизаторов тока, оценка их энергетических и эксплуатационных показателей, влияния несимметрии питающего напряжения и нагрузки на режим работы, определяются области применения ФСТ, а также их достоинства и недостатки.

На основе трёхфазного ЭФМКК, отличающегося широкой зоной устойчивой падающей частью на вольт-амперной характеристике, предложен трёхфазный стабилизатор тока. На рис 1, 2 представлены схемные решения стабилизатора тока, где в первом варианте на три фазы питающей сети подключаются три однофазных ФСТ по схеме «треугольник», во втором варианте эти однофазные стабилизаторы собраны по схеме «звезда», питание осуществляется от трёхфазной сети с нулевым проводом.

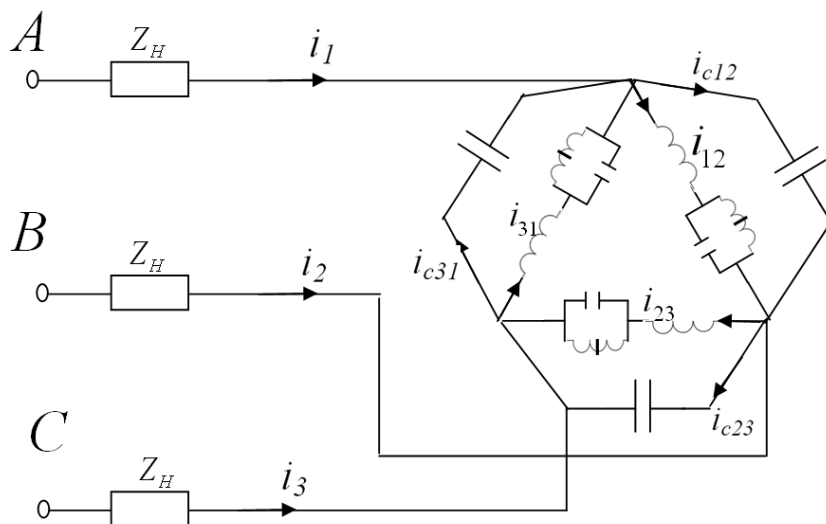


Рис.1. Схема трёхфазного ФСТ



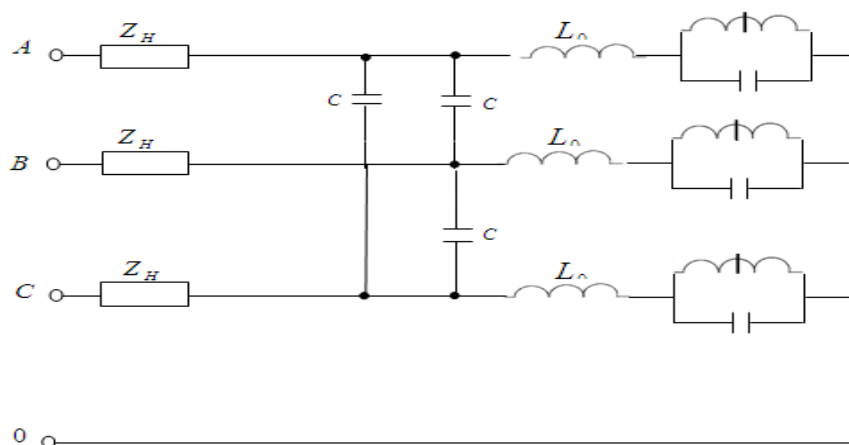


Рис.2. Схема трёхфазного ФСТ

На основе системы уравнений, составленной по законам Кирхгофа, описывающей физические процессы в схеме трёхфазного ФСТ (рис.1), при симметричной активно-индуктивной нагрузке, с учётом ранее принятых допущений и после некоторых преобразований в безразмерной форме, получим:

$$Y_{12} = 3 \frac{y}{\beta_l} \frac{d^5 x}{d\tau^5} + 3\delta \frac{d^4 x}{d\tau^4} + \left[\frac{3y}{\beta_l} (\beta_l + \beta) + 1 \right] \frac{d^3 x}{d\tau^3} + \frac{3y}{\beta_l A} \frac{d^3 x^n}{d\tau^3} +$$

$$+ 3(\beta_l + \beta) \delta \frac{d^2 x}{d\tau^2} + \frac{3\delta}{A} \frac{d^2 x^n}{d\tau^2} + \beta \frac{dx}{d\tau} + \frac{3\delta}{A} \frac{d^3 x^n}{d\tau^2} +$$

$$+ \beta \frac{dx}{d\tau} + \frac{1}{A} (3y + 1) \frac{dx^n}{d\tau} + \frac{3\beta_l}{A} \delta x^n \quad (1)$$

Здесь

$$y = \frac{L_H}{L}; \beta_l = \frac{1}{w^2 L C_l}; \beta = \frac{1}{w^2 L C_2}; \delta = w C_l R_H;$$

$$X = \frac{\Phi_l}{\Phi_\delta}; Y_{12} = \frac{U_{12}}{U_\delta}; \phi_\delta = \sqrt[n-1]{\frac{w^2 W^2 C_2}{AK}}; U_\delta = w^3 W L C_2 \phi_\delta;$$

$$\text{Принимая } y_{12} = y_m \cos(\tau + \psi); \quad x = X_m \sin \tau; \quad (2)$$

Учитывая (1-5) и принимая $\beta=1$ на основе метода гармонического баланса из (1), после ряда преобразований, получим:

$$y_{12m}^2 = \left(3yX_m^n - 3yX_m - \frac{3y}{\beta_l} X_m^n - X_m \right)^2 + 9\delta^2 (\beta_l X_m^n - \beta_l X_m - X_m^n)^2, \quad (3)$$

$$\text{tg } \psi = \frac{3\delta (\beta_l X_m^n - \beta_l X_m - X_m^n)}{3yX_m^n - 3yX_m - \frac{3y}{\beta_l} X_m^n - X_m^n} \quad (4)$$

Для случая активной нагрузки $\gamma=0$ тогда из (3.3), (3.4) имеем:

$$Y_{12m}^2 = X_m^{2n} + 9\delta^2 (\beta_l X_m^n - \beta_l X_m - X_m^n)^2, \quad (5)$$

$$\text{tg } \psi = \frac{3\delta (\beta_l X_m^n - \beta_l X_m - X_m^n)}{X_m^n}. \quad (6)$$

На основе (5) можно построить функции $X_m = f(Y_{12m})$ для различных δ (рис.3). Когда $\gamma=0$ и $\delta=0$, то есть при отсутствии нагрузки

$$Y_{12m} = X_m^n$$

Принимая $Z_l = \frac{i_l}{i_\delta}$; $i_\delta = \omega^2 W C_2 \phi_\delta$ после некоторых преобразований и введения нормированных величин, допуская, что

$x_1 = X_m \sin \tau$, $x_3 = X_m \sin(\tau + 120^\circ)$ для тока нагрузки получим:

$$Z_l = (X_m^n - X_m - \frac{1}{\beta_l} X_m^n + \frac{X_m}{\beta_l} \frac{\beta}{\beta_l} X_m) [\sin \tau - \sin(\tau + 120^\circ)] \quad (7)$$



$$\text{Здесь } \sin \tau - \sin (\tau + 120^0) = \frac{3}{2} \sin \tau - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \tau$$

$$\text{Тогда } Z_{1m} = \sqrt{3} \left(-X_m^n + X_m - \frac{X_m - X_m^n - \beta X_m}{\beta_1} \right) \quad (8)$$

Если примем $\beta=1$, то

$$Z_{1m} = \sqrt{3} \left(-X_m^n + X_m + \frac{X_m^n}{\beta_1} \right) \quad (9)$$

Выражения (3), (4) и (9) служат для построения необходимых характеристик трёхфазного ФСТ для случая симметричной активно-индуктивной нагрузки, когда приложенное трёхфазное напряжение также является симметричным.

Для случая активной нагрузки выражение (5) преобразуем следующим образом

$$Y_m^2 = X_m^{2n} + 3\delta^2 \beta_1^2 \left[\sqrt{3} \left(-X_m^n + X_m + \frac{X_m^n}{\beta_1} \right) \right]^2 \quad (10)$$

Тогда с учётом (3.9)

$$Y_m = X_m^{2n} + 3\delta^2 \beta_1^2 Z_m^2 \quad (11)$$

На основе выражений (9), (11), принимая $n=7$, построены регулировочные и внешние характеристики (рис.3.4.), трёхфазного ФСТ. Анализ серий характеристик показывает, что основные энергетические и эксплуатационные показатели трёхфазного ФСТ почти совпадают с показателями однофазного варианта стабилизатора тока.

С целью изучения влияния несимметрии напряжения сети на работу трехфазного ФСТ, цепи рассмотрим ненагруженный режим стабилизатора тока. Допускаем, что несимметрия проявляется только в значениях амплитуд приложенной трёхфазной системы напряжений, то есть примем:

$$\left. \begin{aligned} Y_{12} &= Y_{12m} \cos (\tau + \psi) \\ Y_{23} &= Y_{23m} \cos (\tau + \psi - 120^0) \\ Y_{31} &= Y_{31m} \cos (\tau + \psi + 120^0) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь $Y_{12m} \neq Y_{23m} \neq Y_{31m}$

Для случая $\delta=0$ и $\beta=1$ из (5)

$$Y_{12m} = X_{12m}^n, Y_{23m} = X_{23m}^n, Y_{31m} = X_{31m}^n \quad (13)$$

Для определения линейных токов воспользуемся следующими зависимостями:

$$i_1 = i_{12} + i_{c12} - i_{31} - i_{c31}, i_2 = i_{23} + i_{c23} - i_{12} - i_{c12}, i_3 = i_{31} + i_{c31} - i_{23} - i_{c23} \quad (14)$$

Принимая $x_1 = X_{1m} \sin \tau, x_2 = X_{2m} \sin (\tau - 120^0), x_3 = X_{3m} \sin (\tau + 120^0)$ имеем:

$$\begin{aligned} Z_1 &= (X_{1m} - X_{1m}^n + \frac{X_{1m}^n}{\beta_1} \sin \tau) - (X_{3m} - X_{3m}^n + \frac{X_{3m}^n}{\beta_1}) \sin (\tau + 120^0) \\ Z_2 &= (X_{2m} - X_{2m}^n + \frac{X_{2m}^n}{\beta_1} \sin (\tau - 120^0)) - (X_{1m} - X_{1m}^n + \frac{X_{1m}^n}{\beta_1}) \sin \tau \\ Z_3 &= (X_{3m} - X_{3m}^n + \frac{X_{3m}^n}{\beta_1}) \sin (\tau - 120^0) - (X_{2m} - X_{2m}^n + \frac{X_{2m}^n}{\beta_1}) \sin (\tau - 120^0) \end{aligned} \quad (15)$$

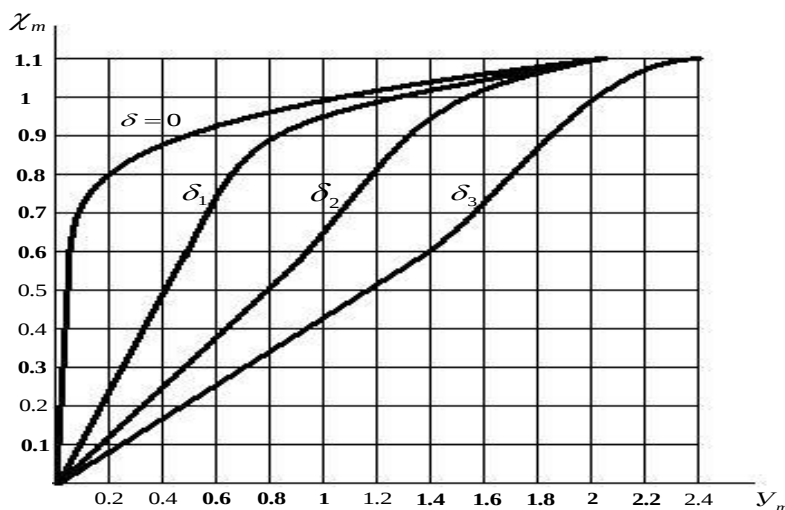


Рис.3. Регулировочные характеристика



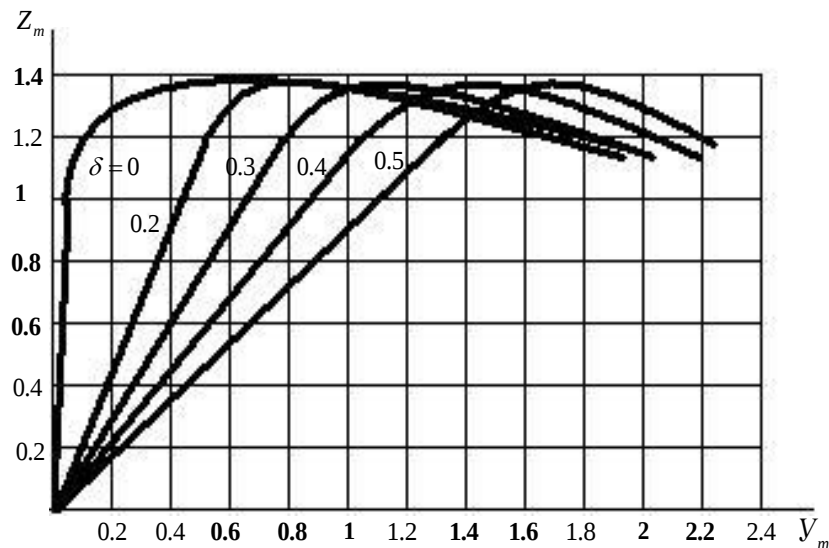


Рис. 4. Регулировочные характеристики

Из этих выражений получим:

$$\begin{aligned} Z_{1m}^2 &= \frac{9}{4} (X_{1m} - X_{1m}^n + \frac{X_{1m}^n}{\beta_1})^2 + \frac{3}{4} (X_{3m} - X_{3m}^n + \frac{X_{3m}^n}{\beta_1})^2, \\ Z_{2m}^2 &= \frac{9}{4} (X_{2m} - X_{2m}^n + \frac{X_{2m}^n}{\beta_1})^2 + \frac{3}{4} (X_{1m} - X_{1m}^n + \frac{X_{1m}^n}{\beta_1})^2, \\ Z_{3m}^2 &= \frac{9}{4} (X_{3m} - X_{3m}^n + \frac{X_{3m}^n}{\beta_1})^2 + \frac{3}{4} (X_{2m} - X_{2m}^n + \frac{X_{2m}^n}{\beta_1})^2, \end{aligned} \quad (16)$$

На основе последних зависимостей, построив вольт-амперные характеристики для каждой фазы, при сохранении режима стабилизации тока, можем определить значения коэффициента несимметрии. Для этого допускается, что напряжение U_{12m} изменяется в пределах от 0,2 до 1,0, а напряжение других фаз, то есть $U_{23m}=U_{31m}=1$. Тогда в режиме стабилизации значение X_{1m} изменяется от 0,8 до 1,0, а $X_{2m}=X_{3m}=1$. Как показали расчёты, при этом коэффициент несимметрии изменяется от 0 до 40%, а значения линейных токов остаются постоянными и равными $Z_{1m}=Z_{2m}=Z_{3m}=1,33$.

Для варианта схемы трёхфазного ФСТ (рис.1) ток нагрузки каждой фазы является суммой токов отдельных элементов цепи. Для оценки гармонического состава стабилизированных линейных токов необходимо найти улучшенное решение нелинейного дифференциального уравнения системы, принимая более точную аппроксимацию кривой намагничивания ферромагнитного элемента. Для этого уравнение цепи в безразмерном виде запишем в следующей форме:

$$\frac{d^2 X_1}{d\tau^2} = \int y_{12} d\tau - \beta x_1 - \frac{X_1^n}{A} - \delta \frac{dX_1}{d\tau} \quad (17)$$

$$\frac{d^2 X_2}{d\tau^2} = \int y_{23} d\tau - \beta x_2 - \frac{X_2^n}{A} - \delta \frac{dX_2}{d\tau} \quad (18)$$

$$\frac{d^2 X_3}{d\tau^2} = \int y_{31} d\tau - \beta x_3 - \frac{X_3^n}{A} - \delta \frac{dX_3}{d\tau} \quad (19)$$

Учитывая (12), (13) и используя методику, изложенную для однофазного ФСТ, имеем

$$x_1 = X_m \sin \tau - \frac{x_m^9}{126} (\frac{84}{9} \sin 3\tau - \frac{36}{25} \sin 5\tau + \frac{9}{49} \sin 7\tau - \frac{1}{81} \sin 9\tau) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} x_2 = & X_{2m} \sin (\tau - 120^\circ) - \frac{x_{2m}^9}{126} (\frac{84}{9} \sin 3\tau - \frac{36}{25} \sin (5\tau - 120^\circ) + \frac{9}{49} \sin (7\tau - 120^\circ) - \\ & - \frac{1}{81} \sin 9\tau) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x_3 = & X_{3m} \sin (\tau + 120^\circ) - \frac{x_{3m}^9}{126} [\frac{84}{9} \sin 3\tau - \frac{36}{25} \sin (5\tau + 120^\circ) + \frac{9}{49} \sin (7\tau + 120^\circ) - \\ & - \frac{1}{81} \sin 9\tau] \end{aligned} \quad (22)$$

Для определения тока в линейной индуктивности воспользуемся следующим выражением:



$$U_{12m} \cos(\omega t + 120^\circ) = L \frac{di_{12}}{dt} + W \frac{d\phi}{dt} \quad (23)$$

$$\text{или } Z_{12} = \int y dx - \beta X_1 \quad (24)$$

$$\text{где } Z_{12} = \frac{i_{12}}{i_8}; \beta = \frac{1}{\omega^2 L C_2}.$$

Таким образом,

$$z_{12} = Y_m \sin(\tau + \psi) - \beta [X_m \sin \tau \frac{x_m^9}{126} (\frac{84}{9} \sin 3 \tau - \frac{36}{25} \sin 5 \tau + \frac{9}{49} \sin 7 \tau - \frac{1}{81} \sin 9 \tau)] \quad (25)$$

$$z_{31} = Y_m \sin(\tau + \psi + 120^\circ) - \beta X_m \sin(\tau + 120^\circ) + \frac{x_m^9}{126} \beta [\frac{84}{9} \sin 3 \tau - \frac{36}{25} \sin(5 \tau + 120^\circ) + \frac{9}{49} \sin(7 \tau + 120^\circ) - \frac{1}{81} \sin 9 \tau]$$

зная, что

$$Z_{c1} = -\frac{1}{\beta_1} Y_m \sin(\tau + \psi)$$

$$Z_1 = Z_{1L} + Z_{c1} - Z_{3L} - Z_{c31}$$

для симметричного случая имеем:

$$Z_1 = Y_m [\sin(\tau + \psi) - \sin(\tau + \psi - 120^\circ)] - \frac{1}{\beta_1} Y [\sin(\tau + \psi) - \sin(\tau + \psi + 120^\circ)] - \beta_1 \frac{x_m^9}{126} \frac{36}{25} [\sin 5 \tau - \sin(5 \tau + 240^\circ)] + \beta_1 \frac{x_m^9}{126} \frac{9}{49} [\sin 7 \tau - \sin(7 \tau + 120^\circ)] \quad (3.27)$$

Аналогичные зависимости можно получить для Z_2 и Z_3 . Из (27) следует, что в составе линейных токов отсутствуют гармоники кратные трём, и форма кривой стабилизированного тока становится близка к синусоиду. На основе последнего выражения получим следующую формулу для расчёта коэффициента нелинейных искажений:

$$K_{\text{НИ}} = \sqrt{\frac{0,000133 X_m^{18}}{\left(Y_m - \frac{Y_m}{\beta_1} - \beta X_m\right)^2 + 0,000133 X_m^{18}}} \quad (28)$$

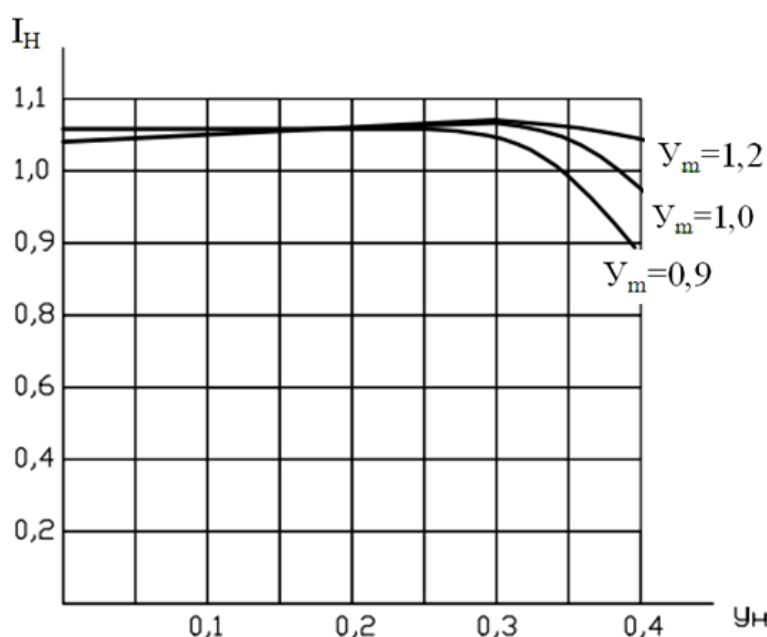


Рис. 5. Внешние характеристики ФСТ

На рис.9 показан график изменения коэффициента нелинейных искажений в зависимости от величины приложенной симметричной системы напряжений. Принят следующий порядок построения графика:

1. Определяется значение X_m для различных U_m по (27);
2. Рассчитывается $K_{ни}$ по величинам X_m и U_m ;
3. Строится зависимость $K_{ни} = f(U_m)$;
1. Сравнение графиков показывает, что коэффициент нелинейных искажений трёхфазного ФСТ, почти в 4-5 раза меньше, чем значение этого коэффициента для однофазного ФСТ.

Таким образом, схема трёхфазного ФСТ имеет улучшенную форму кривой стабилизированного тока. На рис.6, 7, показаны формы кривых стабилизированного тока для различных значений приложенного напряжения.

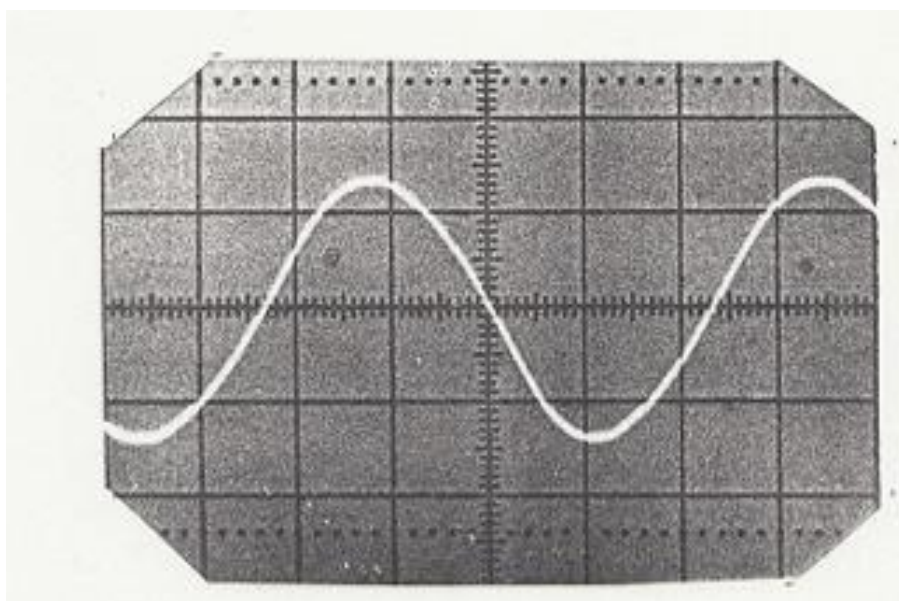


Рис. 6. Форма кривой стабилизированного тока при $V_{в.х}=180$ В

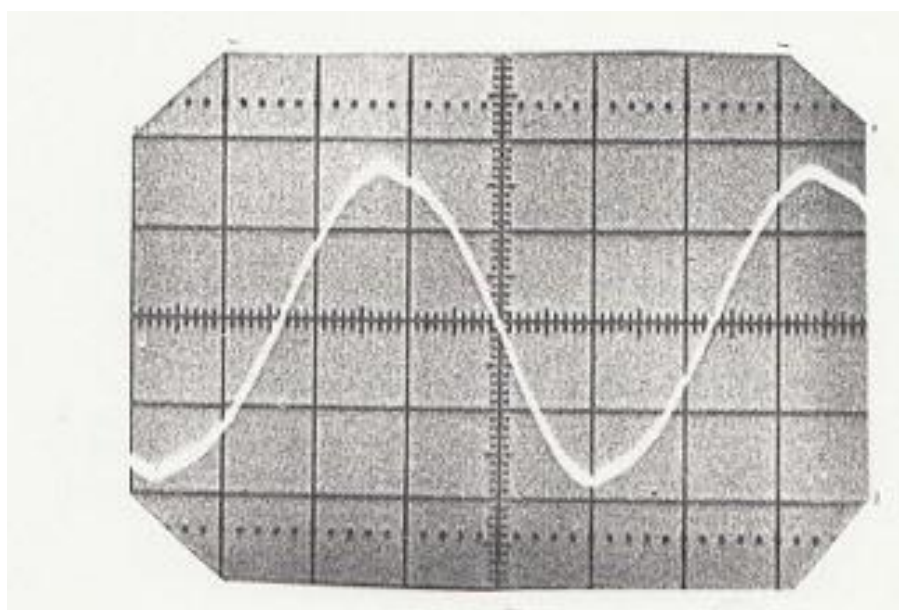


Рис. 7. Форма кривой стабилизированного тока при $V_{в.х}=220$ В

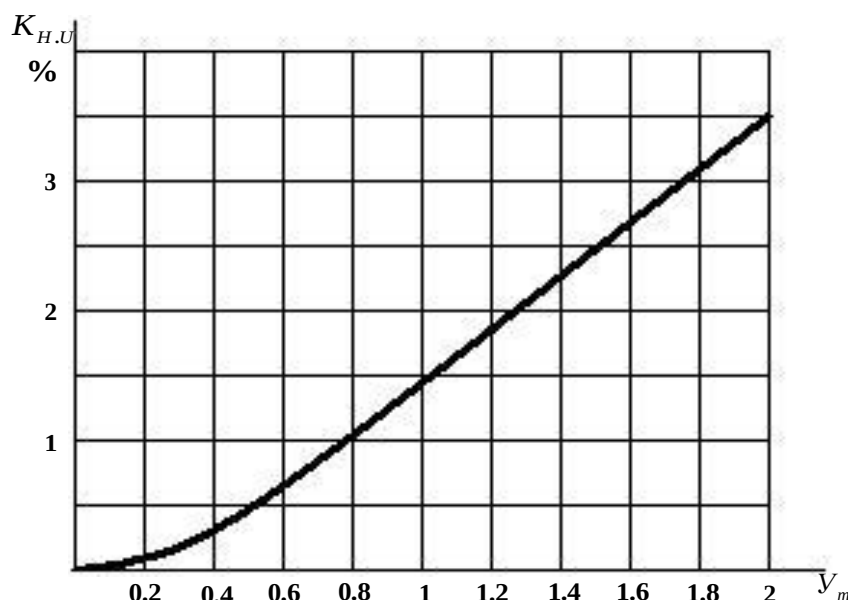


Рис. 8. Зависимость $K_{H.U}=f(Y_m)$

Выводы

1. Допустимый предел изменения коэффициента несимметрии трёхфазной сети по ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электроэнергии» никак не влияет на режим работы трёхфазного ФСТ.
2. Такое свойство рассмотренной цепи позволяет использовать её в качестве симметрирующего устройства, обладающего стабилизирующим эффектом, как при изменении величины нагрузки, так и при отклонении питающего напряжения

Список литературы:

1. Атабеков Г.И., Купальян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1979, 432 с.
2. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1977. -343 с
3. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-ёмкостных преобразователей. Киев.: Наукова думка, 1981. -174 с.
4. Кадыров Т.М. Электро-ферро магнитные цепи, обладающие широким падающим участком на амплитудной и фазовой характеристике. //Известия вузов. Электромеханика, 1988, С.26-30, №7,
5. Кадыров Т.М., Расулов А.Н., Усманов Э.Г., Бакиров А.Б. Двухфазно-однофазный феррорезонансный стабилизатор тока. Известия АН Уз. ССР, серия технических наук, 1990, №4, С.22-26.
6. Кадыров Т.М., Расулов А.Н. Ферро резонансный стабилизатор тока с синусоидальной формой кривой тока. //Автоматика и телемеханика, 1977, №11, С 197-200.
7. Кадыров Т.М., Камалов А.М., Расулов А.Н. Феррорезонанс в двухконтурной цепи с одним ферромагнитным элементом. //Известия АН Уз. ССР, серия технических наук, 1977, №1, С. 30-34.
8. Кадыров Т.М., Расулов А.Н. Стабилизация тока однофазной нагрузки и трёхфазных цепях. //Известия АН Уз. ССР, серия технических наук, 1984, №5, С.21-24.
9. А.С. 634257. Стабилизатор переменного тока. /Т.М.Кадыров, А.Н.Расулов, Н.М.Пардабаева. Опубликовано в БИ, 1978, №43.
10. Кулинич В.А. Индуктивно-ёмкостные управляемые трансформирующие устройства. – М.: Энергоатомиздат, 1987, -177 с.
11. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-ёмкостных преобразователей. – Киев.: Наукова думка, 1974.



12. Расулов А.Н., Рузиназаров М.Р. Феррорезонансные устройства для стабилизации тока. UNIVERSUM: Технические науки: электрон. научн. журн. 2016 № 3-4 (25).
13. Расулов А.Н., Рузиназаров М.Р. Методика расчёта цепи. Научные журналы: "GLOBUS". (42-48 бет) Санкт-Петербург-2016.
14. М.И.Ибадуллаев, А.Н.Расулов, М.Р.Рузиназаров. Стабилизации тока в двухфазно-однафазных цепях. Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. ISSN 2091-5985. 2019, №3-4, С.134-140.
15. М.И.Ибадуллаев, А.Н.Расулов, М.Р.Рузиназаров, Б.Б.Шовкатов. Способы компенсации отрицательного участка вольт-амперной характеристики феррорезонансной цепи. Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. ISSN 2091-5985. 2020, №3-4, С.122-125.
16. А.Н.Расулов, Г.Р.Рафикова, М.Р.Рузиназаров. Стабилизация тока на базе магнитного усилителя с электромагнитной цепью управления. Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. ISSN 2091-5985. 2020, №3-4, С.312-316.
17. A.N.Rasulov, G.R.Rafikova, M.R.Ruzinazarov. "The stabilizing properties and energy indicators of electrical-ferromagnetic oscillatory circuit". "International Journal of Advanced Science and Technology ISSN: 2005-4238 (печать) ISSN: 2207-6360 (онлайн)" Австралия. Vol. 29, No. 11s, (2020), pp. 1541-1547. <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/21174/10724>.
18. A.N.Rasulov, M.R.Ruzinazarov, N.Toirova, T.Sh.Alibekova. Graphical-analytical method for constructing load characteristics. E3S Web of Conferences. Volume 216 (2020). Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems" (RSES 2020). eISSN: 2267-1242. Kazan, Russia, September 21-26, 2020. Volume 216, 01171 (2020).
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601171>.
https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/76/e3sconf_rses2020_01171.pdf

