

*Белоха Г.С.,
к.т.н. Дрючин В.Г.,
к.т.н. Самчелев Ю.П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА

Показана побудова універсального джерела живлення з розширеним діапазоном регулювання струму, представлена його математична модель, отримані діаграми, які ілюструють результати його роботи.

***Ключові слова:** джерело живлення, перетворювач, діапазон регулювання*

Показано построение универсального источника питания с расширенным диапазоном регулирования тока, представлена его математическая модель, получены диаграммы иллюстрирующие результаты его работы.

***Ключевые слова:** источник питания, преобразователь, диапазон регулирования*

Введение. Разработка преобразователей (источников питания) с широкими функциональными возможностями при высокой степени электромагнитной совместимости с питающей сетью является важнейшей современной задачей в области преобразовательной техники [1].

В [2] рассмотрен универсальный неререверсивный электромагнитно совместимый с сетью источник питания (под универсальностью понимаем возможность обеспечения работы источника питания в режимах источника тока, напряжения и мощности). В [3] показано, что такой источник имеет ограниченный диапазон регулирования напряжения (тока) в нагрузке, чем сужается область возможных его применений.

При этом электромагнитная совместимость достигается применением силового активного фильтра (САФ), обеспечивающего принудительное формирование потребляемых из сети токов близкой к синусоидальной форме при $\cos\varphi=1$ ($\varphi=0$).

Известно, что надежная работа САФ обеспечивается при условии $U_{САФ} > U_{ml}$ ($U_{САФ}$ - напряжение на конденсаторе САФ, U_{ml} - амплитуда линейного напряжения питания). С учетом того, что напряжение на

нагрузке равно напряжению $U_{САФ}$, то указанное условие ограничивает диапазон регулирования напряжения (тока) на выходе источника.

Цель работы – продемонстрировать возможность построения универсального реверсивного источника питания с релейным управлением и с расширенным диапазоном регулирования напряжения (тока) и с сохранением принципа принудительного формирования синусоидальных, потребляемых из сети, токов при $\cos\varphi=1$.

Материал исследования. Расширение диапазона регулирования достигается путем подключения источника к сети через понижающий трансформатор. Тогда диапазон регулирования увеличиться в k раз, где

k коэффициент трансформации трансформатора ($D = \frac{U_{САФ}}{U_{2ml}} = \frac{U_{САФ}k}{U_{1ml}}$).

В предлагаемом источнике САФ выполнен на базе двух мостовых выпрямителей включенных встречно-параллельно, благодаря этому появляется возможность изменения полярности напряжения (тока) на выходе САФ и, значит на нагрузке (режим реверсирования).

Функциональная схема предлагаемого источника питания представлена на рисунке 1.

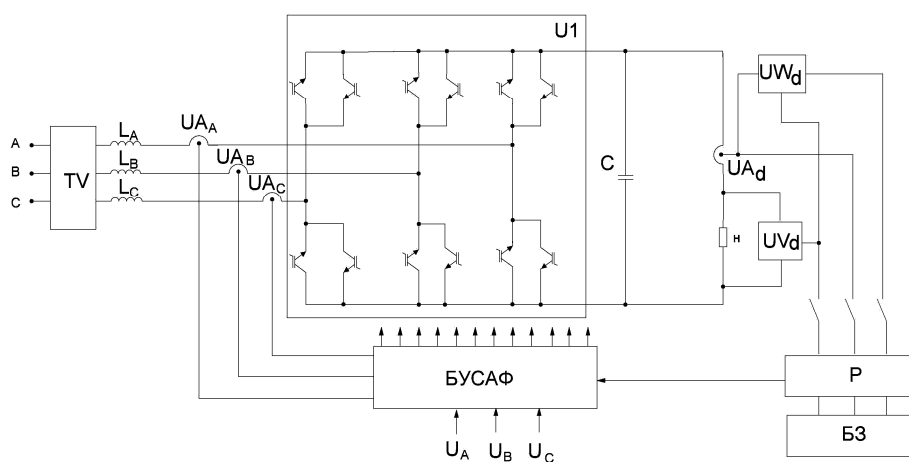


Рисунок 1 – Функциональная схема источника питания

Силовой активный фильтр подключен к вторичным обмоткам трансформатора TV через дроссели L_A, L_B, L_C и датчики фазных токов $U_{A_A}, U_{A_B}, U_{A_C}$. Напряжение, ток и мощность в цепи нагрузки контролируются соответственно датчиками U_{V_d}, U_{A_d} и U_{W_d} . Управление преобразователем выполнено двухконтурное: внутренний контур с релейными регуляторами обеспечивает принудительное формирование потребляемых от трансформатора токов близкой к синусои-

дальной форме (БУСАФ), амплитуда которых задается регулятором внешнего контура, который может быть регулятором тока нагрузки, регулятором напряжения на нагрузке или регулятором мощности нагрузки. Регулятор (Р) внешнего контура может быть П - , ПИ - , ПИД – регуляторами в зависимости от требований к качеству регулирования координат.

В соответствии с принципом действия преобразователя внутренний контур, обеспечивающий заданную величину и синусоидальность потребляемых из сети токов, описывается следующими выражениями:

Фаза «А»

$$i_{A3} - i_A = \Delta i_A$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A + \alpha U_{САФ}, -a \leq \Delta i_A \leq a, \frac{di_A}{dt} > 0 \quad (1)$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - \alpha U_C, a \geq \Delta i_A \geq -a, \frac{di_A}{dt} < 0,$$

Фаза «В»

$$i_{B3} - i_B = \Delta i_B$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + i_B R_B = u_B + \alpha U_{САФ}, -a \leq \Delta i_B \leq a, \frac{di_B}{dt} > 0 \quad (2)$$

$$L_B \frac{di_B}{dt} + i_B R_B = u_B - \alpha U_{САФ}, a \geq \Delta i_B \geq -a, \frac{di_B}{dt} < 0,$$

Фаза «С»

$$i_{C3} - i_C = \Delta i_C$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + i_C R_C = u_C + \alpha U_{САФ}, -a \leq \Delta i_C \leq a, \frac{di_C}{dt} > 0 \quad (3)$$

$$L_C \frac{di_C}{dt} + i_C R_C = u_C - \alpha U_{САФ}, a \geq \Delta i_C \geq -a, \frac{di_C}{dt} < 0,$$

где u_A, u_B, u_C – мгновенные значения фазных напряжений;

$U_{САФ}$ - напряжение на конденсаторе САФ;

i_{A3}, i_{B3}, i_{C3} и i_A, i_B, i_C - токи задания и действительное их значения;

a – ширина петли гистерезиса релейных регуляторов;

α, β, γ - коэффициенты распределения напряжения $U_{САФ}$ по фазам преобразователя.

В соответствии с алгоритмом включения вентиля САФ коэффициенты равны $\frac{2}{3}$, если $|u_A| \geq \frac{\sqrt{3}}{2} U_{mA}$, $|u_B| \geq \frac{\sqrt{3}}{2} U_{mB}$, $|u_C| \geq \frac{\sqrt{3}}{2} U_{mC}$ и равны $\frac{1}{3}$, если мгновенные значения фазных напряжений по модулю меньше значений $\frac{\sqrt{3}}{2} U_m$ (U_m - амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора).

Объектом управления внешнего контура является САФ с нагрузкой, работу которого можно описать уравнением баланса мощностей:

$$p = P_d + \Delta P + \frac{d}{dt} \frac{CU_{САФ}^2}{2} = kP_d + \frac{d}{dt} \frac{CU_{САФ}^2}{2}; \quad (4)$$

где $p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$ – мгновенная мощность, потребляемая от трансформатора

P_n - мощность нагрузки;

k - коэффициент, учитывающий потери в преобразователе;

C - емкость конденсатора САФ.

После преобразования (4) получим

$$\frac{dU_{САФ}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{U_{САФ}} (p - kP_d) \quad (5)$$

т.е. объект управления внешнего контура можно представить звеном первого порядка с переменным коэффициентом. Выходной координатой данного звена является напряжение на конденсаторе САФ (напряжение на нагрузке), которое необходимо регулировать в зависимости от режима работы, а входом – разность мощности потребляемой от трансформатора и мощности нагрузки с учетом потерь.

На основании выражений (1-5) можно построить математическую модель преобразователя, которая представлена на рисунке 2.

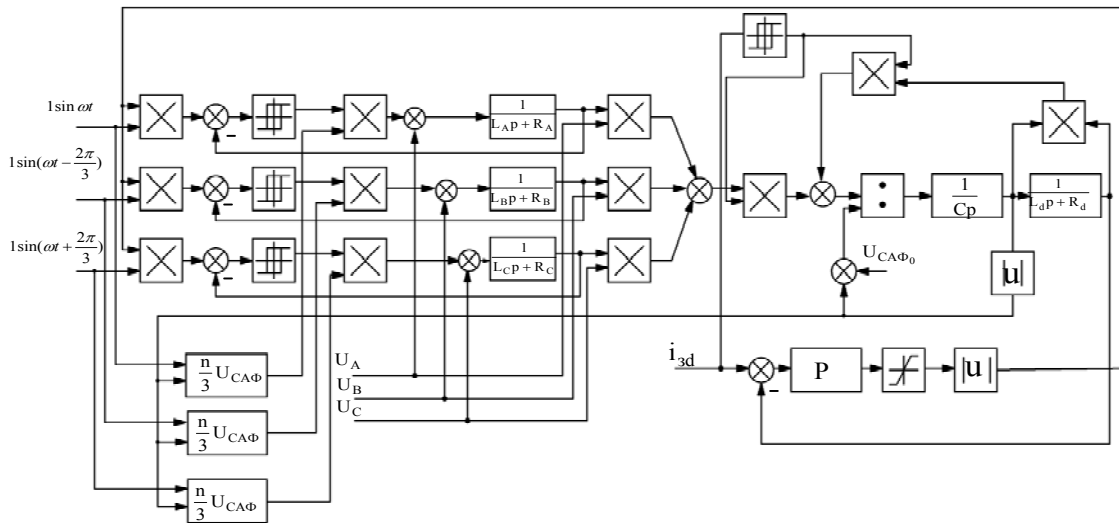


Рисунок 2 – Математическая модель преобразователя

На рисунке 3 представлены осциллограммы, потребляемых токов и тока нагрузки при питании от сети (а) и при питании от трансформатора (б), полученные на модели. Из рисунка следует, что потребляемые из сети токи для обоих вариантов имеют синусоидальную форму при $\cos\varphi=1$ (решена проблема электромагнитной совместимости), а минимальное значение тока в нагрузке уменьшилось в 10 раз (коэффициент трансформации $k=10$).

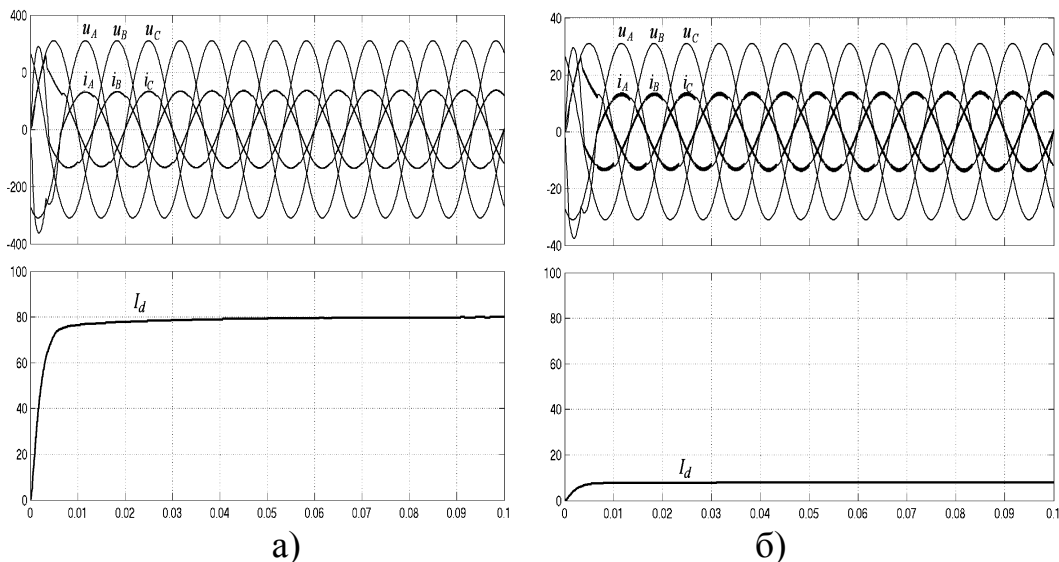


Рисунок 3 – Осциллограммы потребляемых токов и тока в нагрузке при питании от сети (а) и при питании от трансформатора (б)

Предложенная модель позволяет (с минимальной затратой машинного времени) выполнить исследования различных режимов работы

источника при варьировании параметров регулятора и объекта не привязываясь к конкретному схемотехническому решению САФ.

На рисунке 4 показан процесс реверсирования тока в цепи нагрузки. Так как в этом случае меняется величина и знак тока нагрузки, то в цепях потребляемых токов имеет место кратковременный переходный процесс.

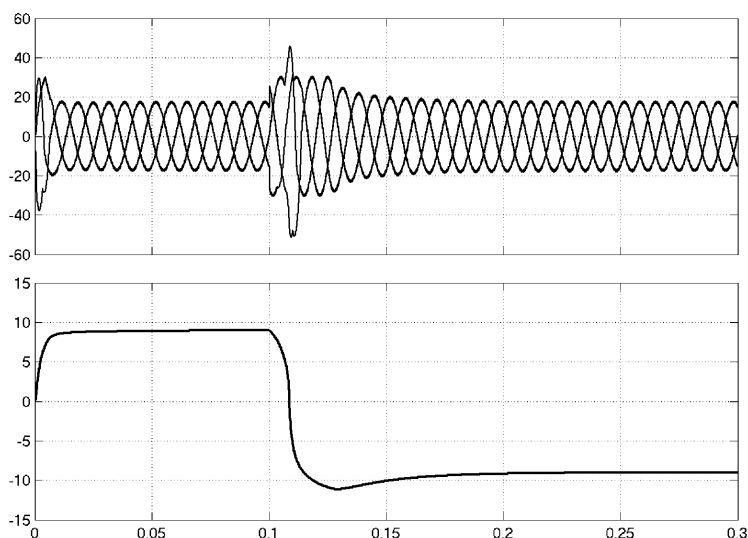


Рисунок 4 – Процесс реверсирования тока в цепи нагрузки

В соответствии с математическим описанием преобразователя можно определить частоту колебаний действительных токов, потребляемых от трансформатора, относительно заданных значений токов (частота релейного режима).

Запишем выражения (1), которые будут иметь место при отработке заданного синусоидального тока \dot{i}_{A_3} фазы А. При возрастании тока от $(\dot{i}_{A_3} - a)$ до $(\dot{i}_{A_3} + a)$ второе уравнение выражения (1) запишется:

$$I_m R_A \sin \omega t + I_m X_A \cos \omega t + L_A \frac{2a}{t_1} = U_m \sin \omega t + \alpha U_{CA\Phi} \quad (6)$$

А при убывании тока от $(\dot{i}_{A_3} + a)$ до $(\dot{i}_{A_3} - a)$ это выражение будет иметь вид

$$I_m R_A \sin \omega t + I_m X_A \cos \omega t + L_A \frac{2a}{t_2} = U_m \sin \omega t - \alpha U_{CA\Phi} \quad (7)$$

где R_A, L_A, X_A – активное и индуктивное сопротивление дросселя на частоте питающей сети;

I_m, U_m – амплитудные значения фазных напряжений и токов вторичной обмотки трансформатора TV;

t_1 – длительность изменения фазного тока от $(i_{A_3} - a)$ до $(i_{A_3} + a)$;

t_2 – длительность изменения фазного тока от $(i_{A_3} + a)$ до $(i_{A_3} - a)$.

Решая (6) и (7) относительно t_1 и t_2 получим выражение для частоты релейного режима:

$$\nu = \frac{(\alpha U_{CA\Phi})^2 - (U_m \sin \omega t - I_m Z_A \sin(\omega t + \arctg \frac{X_A}{R_A}))}{4aL_A \alpha U_{CA\Phi}} \quad (8)$$

Учитывая, что $\alpha = \frac{2}{3}$ при $\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}$ и при $\frac{4\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{3}$, а при $0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3}$, $\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{4\pi}{3}$ и $\frac{5\pi}{3} \leq \omega t \leq 2\pi$ $\alpha = \frac{1}{3}$, получим выражение для частоты релейного режима, например фазы А.

$$\nu = \frac{(\frac{2}{3} U_{CA\Phi})^2 - (U_m \sin \omega t - I_m Z_A \sin(\omega t + \arctg \frac{X_A}{R_A}))}{4aL_A \frac{2}{3} U_{CA\Phi}} \quad (9)$$

$$\nu = \frac{(\frac{1}{3} U_{CA\Phi})^2 - (U_m \sin \omega t - I_m Z_A \sin(\omega t + \arctg \frac{X_A}{R_A}))}{4aL_A \frac{1}{3} U_{CA\Phi}} \quad (10)$$

Аналогично определяются частоты колебаний для токов в фазах В и С.

Анализ (8-10) показывает, что частота колебаний формируемых синусоидальных токов величина переменная при отработке заданного синусоидального тока изменяется на протяжении периода. Учитывая,

что параметры дросселя (R_A, L_A, X_A) малы, то Z_A приближенно можно считать равным нулю. Тогда и будут иметь вид

$$U = \frac{4U_{CA\Phi}^2 - 9U_m^2 \sin^2 \omega t}{24aU_{CA\Phi}L_A} \quad (11)$$

$$U = \frac{U_{CA\Phi}^2 - 9U_m^2 \sin^2 \omega t}{12aU_{CA\Phi}L_A} \quad (12)$$

Выводы. Таким образом, предложенный источник питания позволяет:

- осуществить реверсирования выходного напряжения (тока);
- расширить диапазон регулирования напряжения (тока) выбором соответствующего коэффициента трансформации трансформатора;
- реализовать высокую степень электромагнитной совместимости во всех стационарных режимах.

Библиографический список

1. Денесюк С.П. Стан та перспективи розвитку силової електроніки / С.П. Денесюк, В.Я. Жуйков, О.В. Кириленко, Р. Стржецьки // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та електроефективність – ч.1 – С.8.

2. Пат. 62389, МПК H02M 7/12. Універсальне електромагнітносумісне джерело живлення/ Дрючин В.Г., Самчелєєв Ю.П., Шевченко И.С., Белоха Г.С.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №U201101605; заявл. 11.02.2011; опубл. 25.08.2011, Бюл. № 16.

3. Дрючин В.Г. Математическое моделирование систем стабилизации тока с релейным управлением /В.Г. Дрючин, Ю.П. Самчелєєв, И.С. Шевченко, Г.С. Белоха // «Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації» № 1 (23) 2011, С. 28 – 32.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.