

УДК 621.314

А.С.ГОРБУНОВ, старший преподаватель (УГАТУ)
А.А.МЕДНОВ, младший научный сотрудник (УГАТУ)
Научный руководитель Л.Э. РОГИНСКАЯ, д.т.н., профессор (УГАТУ)
г.Уфа

ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО КАК ВХОДНОЕ ЗВЕНО ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК, ВКЛЮЧАЮЩИХ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Современный этап научно-технологического развития характеризуется быстрой интеграцией разработок в промышленное производство и повседневный быт. Стремительность развития науки и техники отнюдь не оставляет нерешенных задач для отечественных и зарубежных учёных и инноваторов. Специфика же трудов учёных и инноваторов в России заключается в преимущественном внедрении продуктов инновационной деятельности в промышленное производство [1].

Производство деталей в машиностроительных производствах часто требует упрочнения, нанесения защитных и декоративных покрытий, подразумевает выполнение их соединений в сборочных единицах путем сварки и спайки. Кроме того, производство ряда деталей и вовсе связано с литьевым производством, получение расплавов для которого является важной производственной задачей. Для решения указанных задач в промышленности применяются электротехнологические установки, включающие индукционный нагрев (далее - ЭТУИН). Они позволяют выполнять разогрев как слоя металла, так и всю заготовку целиком [2] Глубина разогрева при этом напрямую зависит от характеристик материала и параметров источника питания (далее - ИП) [3]:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

μ – относительная магнитная проницаемость:

f – частота тока, Гц.

От ИП ЭТУИН зависит и ряд других характеристик, таких как время разогрева заготовки, количество и размеры деталей, находящихся в параллельной обработке, количество термообрабатываемых зон, мощность электроустановки [4]. ИП ЭТУИН преобразует все параметры электроэнергии промышленной сети до требуемых значений в несколько этапов: согласование с сетью, выпрямление, инвертирование, согласование с

**IV Всероссийская молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
305-2**
18-20 ноября 2021 года

нагрузкой. Каждый этап при этом нуждается в проектировании отдельного электрического преобразователя или устройства. Общая схема установки может быть представлена в следующем виде (рисунок 1).

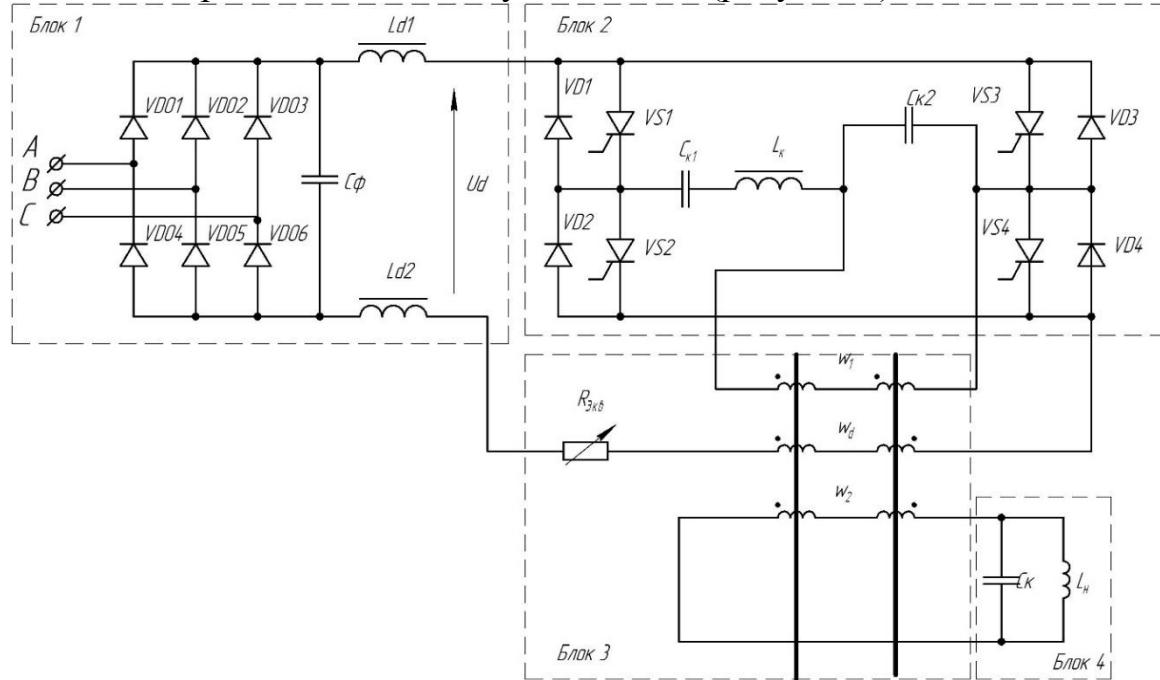


Рисунок 1 Схема ИП ЭТУИН

Блок 1 – трансформаторно-выпрямительное устройство; Блок 2 – высокочастотный инвертор; Блок 3 – многофункциональный согласующий трансформатор; Блок 4 – нагрузка с батареей компенсирующих конденсаторов.

На практике и в литературе часто принято объединять первые два этапа, а вместе с тем и устройства в единый узел – трансформаторно-выпрямительное устройство. Трансформатор при этом часто называют выпрямительным или фазопреобразующими [5]. Блок выпрямителей для выпрямительного трансформатора имеет полупроводниковые выпрямительные устройства, осуществляющие преобразование переменного напряжения в постоянное. Конструктивно они бывают управляемые и неуправляемые. Электрически их соединяют в различные схемы выпрямления [6,7]. Схема выпрямления, а также количество фаз выпрямительного трансформатора определяют качество выпрямленного напряжения выпрямительной системы и частоту пульсаций выходного напряжения.

Процесс работы трансформатора в выпрямительном устройстве характеризуется его математической моделью. Модель представлена для восемнадцатипульсной системы выпрямления.

Первичная цепь, соединенная по схеме «звезда» характеризуется системой уравнений:

**IV Всероссийская молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
18-20 ноября 2021 года**

305-3

$$\begin{cases} i_{11} + i_{12} + i_{13} = 0; \\ u_{12} = i_{11}R_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} - i_{12}R_1 - L_{s1} \frac{di_{12}}{dt} - w_1 \frac{d\Phi_2}{dt}; \\ u_{23} = i_{12}R_1 + L_{s1} \frac{di_{12}}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} - i_{13}R_1 - L_{s1} \frac{di_{13}}{dt} - w_1 \frac{d\Phi_3}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

где i_{11}, i_{12}, i_{13} – токи в фазах А, В и С первичной обмотки;
 u_{11}, u_{22} – фазные напряжения первичной обмотки, В;
 R_1 – активное сопротивление первичной обмотки, Ом;
 L_{s1} – индуктивность рассеяния первичной обмотки, Гн
 Φ_1, Φ_2, Φ_3 – магнитные потоки трансформатора, Вб.

Для вторичной цепи система уравнений напряжений выглядит следующим образом:

первая вторичная обмотка, соединенная по схеме «звезда»:

$$\begin{cases} u_{21} = -i_{21}R_{21} - L_{s21} \frac{di_{21}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_1}{dt}; \\ u_{22} = -i_{22}R_{21} - L_{s21} \frac{di_{22}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_2}{dt}; \\ u_{23} = -i_{23}R_{21} - L_{s21} \frac{di_{23}}{dt} - w_2 \frac{d\Phi_3}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

где i_{21}, i_{22}, i_{23} – токи в фазах вторичной обмотки $a_1b_1c_1(x_1y_1z_1)$, А;
 u_{21}, u_{22}, u_{23} – фазные напряжения обмотки $a_1b_1c_1(x_1y_1z_1)$, В;
 L_{s21} – индуктивность рассеяния обмотки $a_1b_1c_1(x_1y_1z_1)$, Гн;
 R_{21} – активное сопротивление обмотки $a_1b_1c_1(x_1y_1z_1)$, Ом.

вторая вторичная обмотка, соединенная по схеме «зигзаг»:

$$\begin{cases} -0,4w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + 0,74w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i'_{21}R_{22} + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di'_{21}}{dt} + u'_{21} \\ 0,74w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - 0,4w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,4 + 0,74)i'_{22}R_{22} + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di'_{22}}{dt} + u'_{22}, \\ 0,74w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} - 0,4w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i'_{23}R_{22} + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s2} \frac{di'_{23}}{dt} + u'_{23} \end{cases} \quad (4)$$

где $i'_{21}, i'_{22}, i'_{23}$ – токи в фазах вторичной обмотки $a_2b_2c_2(x_2y_2z_2)$;
 $u'_{21}, u'_{22}, u'_{23}$ – фазные напряжения обмотки $a_2b_2c_2(x_2y_2z_2)$, В;
 L_{s22} – индуктивность рассеяния обмотки $a_2b_2c_2(x_2y_2z_2)$, Гн;

**IV Всероссийская молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
18-20 ноября 2021 года**

305-4

R_{22} – активное сопротивление обмотки $a_1b_1c_1(x_1y_1z_1)$, Ом.

третья вторичная обмотка, соединенная по схеме «зигзаг»:

$$\begin{cases} -0,4w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + 0,74w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i''_{21}R_{23} + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s23} \frac{di''_{21}}{dt} + u''_{21} \\ 0,74w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} - 0,4w_2 \frac{d\Phi_3}{dt} = (0,4 + 0,74)i''_{22}R_{23} + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s23} \frac{di''_{22}}{dt} + u''_{22} \\ -0,4w_2 \frac{d\Phi_1}{dt} + 0,74w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = (0,4 + 0,74)i''_{23}R_{23} + (0,4^2 + 0,74^2)L_{s23} \frac{di''_{23}}{dt} + u''_{23} \end{cases}, \quad (5)$$

где $i''_{21}, i''_{22}, i''_{23}$ – токи в фазах вторичной обмотки $a_3b_3c_3(x_3y_3z_3)$;

$u''_{21}, u''_{22}, u''_{23}$ – фазные напряжения обмотки $a_3b_3c_3(x_3y_3z_3)$, В;

L_{s23} – индуктивность рассеяния обмотки $a_3b_3c_3(x_3y_3z_3)$, Гн;

R_{23} – активное сопротивление обмотки $a_3b_3c_3(x_3y_3z_3)$, Ом.

Индуктивности рассеяния обмоток $L_{s1}, L_{s21}, L_{s22}, L_{s23}$ приблизительно пропорциональны квадрату количества витков в них.

При работе схемы выпрямленные напряжения отдельных мостов и токи суммируются.

Векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток трансформатора представлена на рисунке 3.

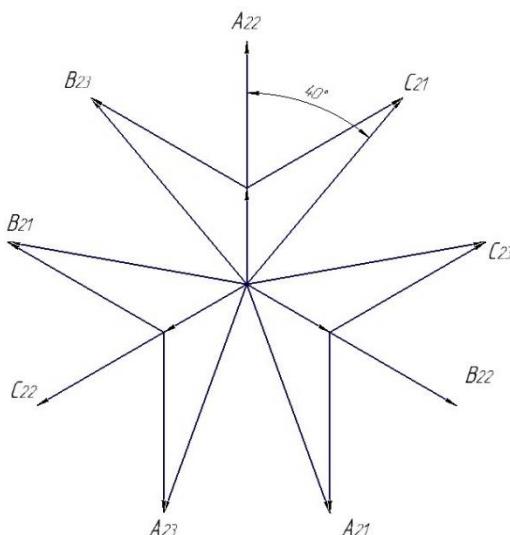


Рисунок 3 Векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток трансформатора

Таким образом, применение трансформаторно-выпрямительного устройства в качестве входного звена ИП ЭТУИН позволяет осуществлять согласование питающей сети с ИП, обеспечивая при этом необходимую величину входного напряжения для его инвертирования с требуемой частотой.

Список литературы

1. Индикаторы инновационной деятельности: 2021 : статистический сборник / Л. М. Гохберг, Г. А. Грачева, К. А. Дитковский и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2021. – 280 с. – 250 экз. – ISBN 978-5-7598-2375-9 (в обл.).
2. Латыпов А.Р. Высокочастотный многофункциональный источник питания для электротехнологии: дис. канд. техн. наук. Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, 2018.
3. Официальный сайт общества с ограниченной ответственностью "Проминдуктор ТМ" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://prominductor.ru/articles/glubina_proniknoveniya_toka_v_metall_/, – Глубина проникновения тока в металл. – (Дата обращения: 18.10.2021).
4. Wesołowski, M. & Niedbała, R. Simulation of multi-zone, multi-frequency induction heating systems. 2014; 90. 225-229. DOI: 10.12915/pe.2014.02.57.
5. Рогинская, Л.Э. Улучшение электромагнитной совместимости преобразовательных устройств с сетью и нагрузкой с помощью многофазных трансформаторов / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов, З.И. Ялалова // Электротехнические и информационные комплексы и системы, УГУЭС. – № 3 – Т. 10 – 2014 – С. 21–30.
6. Tarragona Mario, Sarnago Hector, Lucia Oscar, Burdio Jose.. Multi-Phase PFC Rectifier and Modulation Strategies for Domestic Induction Heating Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020; PP. 1-1. DOI: 10.1109/TIE.2020.3005096.
7. Белкин, А.К. Тиристорные преобразователи частоты / А.К. Белкин, Т.П. Костюкова, Л.Э.Рогинская, А. А. Шуляк.— М. : Энергоатомиздат, 2000 .— 263 с. : ил. ; 21см.

Информация об авторах:

Горбунов Антон Сергеевич, старший преподаватель, Электромеханика, УГАТУ, 450000, г.Уфа, ул. Карла Маркса д.12 корп.4. e-mail: freizeranton@yandex.ru

Меднов Антон Александрович, младший научный сотрудник кафедры Электромеханика, УГАТУ, 450000, г.Уфа, ул. Карла Маркса д.12 корп.4. e-mail: antonkind@inbox.ru

Рогинская Любовь Эммануиловна, д.т.н., профессор кафедры Электромеханика, УГАТУ, 450000, г.Уфа, ул. Карла Маркса д.12 корп.4. e-mail: roginskaya36@mail.ru