

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ – МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА



**СБОРНИК  
СТУДЕНЧЕСКИХ НАУЧНЫХ РАБОТ**

ВЫПУСК 27  
Часть -I

Москва  
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева  
2020

УДК 63. 001-57(082)

ББК4я431

С 23

**С 23 Сборник студенческих научных работ. Вып. 27. Часть – I /**  
Коллектив авторов; Российский государственный аграрный универси-  
тет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва : Издательство РГАУ-  
МСХА, 2020. – 539 с.

ISBN 978-5-9675-1772-3

*Редакционная коллегия*

**Проф. И.С. Константинов, проф. Ю.А. Юлдашбаев, проф. А.Г. Раджабов**  
**проф. В.И. Леунов, проф. Б.А. Борисов, проф. Л.И. Хоружий,**  
**проф. Кубрушко, проф. А.А. Мамедов, доц. Ю.В. Катаев,**  
**доц. Д.М. Бенин, доц. Р.В. Сычев, доц. В.Г. Борулько,**  
**доц. Н.А. Мочунова, доц. А.А. Манохина, доц. Р.А. Мигунов,**  
**асс. А.А. Анисимов, ст. преп. Н.В. Минаев, ст. преп. А.С. Заикина,**  
**доц. С.А. Масловский, доц. А.А. Миронов,**  
**рук. СНО, доц. А.Е. Харитонова, доц. З.Ф. Садыкова**

В сборнике представлены статьи, подготовленные по материалам докладов, 73-й Международной студенческой научно-практической конференции, посвященной 180-летию со дня рождения М.К. Турского, которая проходила в РГАУ МСХА имени К.А. Тимирязева 24-27 марта 2020 г.

Сборник предназначен для студентов бакалавриата, магистратуры аспирантов, преподавателей, научных работников.

ISBN 978-5-9675-1772-3

© Коллектив авторов, 2020

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени  
К.А. Тимирязева, 2020

## ТРЕХФАЗНЫЙ СТАТИЧЕСКИЙ УТРОИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОЛЕМ ДЛЯ ПИТАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Константинов Роман Дмитриевич, магистрант 2 курса института механики и энергетики имени В.П. Горячкина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, [romeo9115@bk.ru](mailto:romeo9115@bk.ru)*

**Аннотация:** Разработаны статический утроитель частоты и основы его теории. Принцип действия основан на выделении третьей гармоники индукции при насыщенном магнитопроводе. Использование утроителя частоты в электроприводе дает экономический эффект, так как повышается производительность труда и уменьшаются масса и габариты электрооборудования.

**Ключевые слова:** утроитель частоты, вращающееся магнитное поле, магнитопровод, гармоники насыщения, электропривод.

Электропривод повышенной частоты – перспективное направление в области электрификации сельского хозяйства. Велика потребность промышленности в высокоэффективных, высокоскоростных электродвигателях. Утроитель частоты предназначен для использования в качестве источника питания асинхронных двигателей и другого электрооборудования напряжением с частотой 150 Гц.

Разработан ферромагнитный статический утроитель частоты, с вращающимся магнитным полем. Утроитель частоты выполнен на основе кольцевого магнитопровода. Последний состоит из статора и вставленного в его расточку с минимальным технологическим зазором неподвижного внутреннего сердечника, который по аналогии с электрической машиной, условно называется ротором. В пазы статора уложены две трёхфазные обмотки. Первичная, выполненная на число пар полюсов  $p_1 = 1$ , подключается на номинальное напряжение к сети с частотой  $f_1 = 50$  Гц. Вторичная обмотка имеет число пар полюсов  $p_2 = 3p_1$ . При насыщении магнитопровода в магнитном поле кроме первой, основной гармоники, проявляются высшие  $v$ -е гармоники (они называются гармониками насыщения), которые вращаются с той же скоростью, что и основная гармоника,  $n_v = n_1$ , но имеют число пар полюсов в  $v$  раз большее, чем у первой гармоники,  $p_v = 3p_1$ . Наиболее ярко выраженной из высших гармоник насыщения является третья. Она будет индуцировать во вторичной обмотке ЭДС утроенной частоты,  $f_3 = 3f_1 = 150$  Гц. Напряжением частоты 150 Гц питаются ручной электроинструмент, погружные асинхронные электронасосы и другое электрооборудование, рассчитанное на эту повышенную частоту. Масса и габариты такого оборудования существенно меньше, чем у рассчитанного на промышленную частоту, а технологический цикл обеспечивается им эффективнее. Утроитель частоты, кроме двух трёхфазных обмоток может еще иметь две тороидальные обмотки постоян-

ного тока (ОП1 и ОП2). Они охватывают поперечные сечения ярм статора и ротора и создают кольцевые магнитные поля, замыкающиеся вдоль ярм. Наложение этих полей на вращающееся поле оказывает влияние на амплитуду и фазу третьей гармоники. Это, в определённых случаях, приводит к улучшению ряда показателей утроителя частоты. На рисунке 1,а изображена активная часть утроителя частоты, на рисунке 1,б представлен изготовленный утроитель.

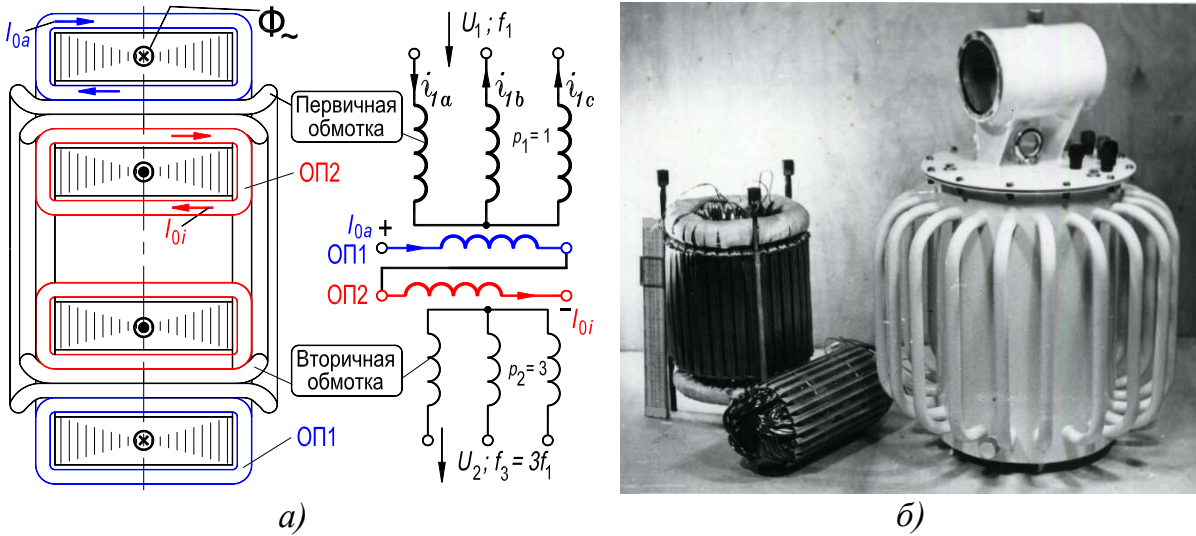


Рисунок 1 – Схема активной части (а) и изготовленный (б) утроитель

Для определения соотношений, характеризующих поперечную геометрию магнитопровода утроителя, выведено расчетное нелинейное уравнение магнитной цепи, состоящей из ярм, немагнитного зазора и зубцово-пазового слоя (каждое ярмо охватывается своей тороидальной обмоткой, а трехфазные обмотки ( $p_1 = 1, p_2 = 3$ ) уложены в пазы статора – наружного сердечника) [1].

Соотношения, характеризующие поперечную геометрию утроителя частоты, влияют на формирование гармоник насыщения магнитного поля. Эти гармоники обуславливают изменение потерь в стали и некоторое искажение формы кривой тока. Поэтому выбор рациональной поперечной геометрии магнитопровода является важнейшей частью электромагнитного расчета утроителя частоты.

Расчетное нелинейное уравнение магнитной цепи в безразмерных единицах имеет следующий вид:

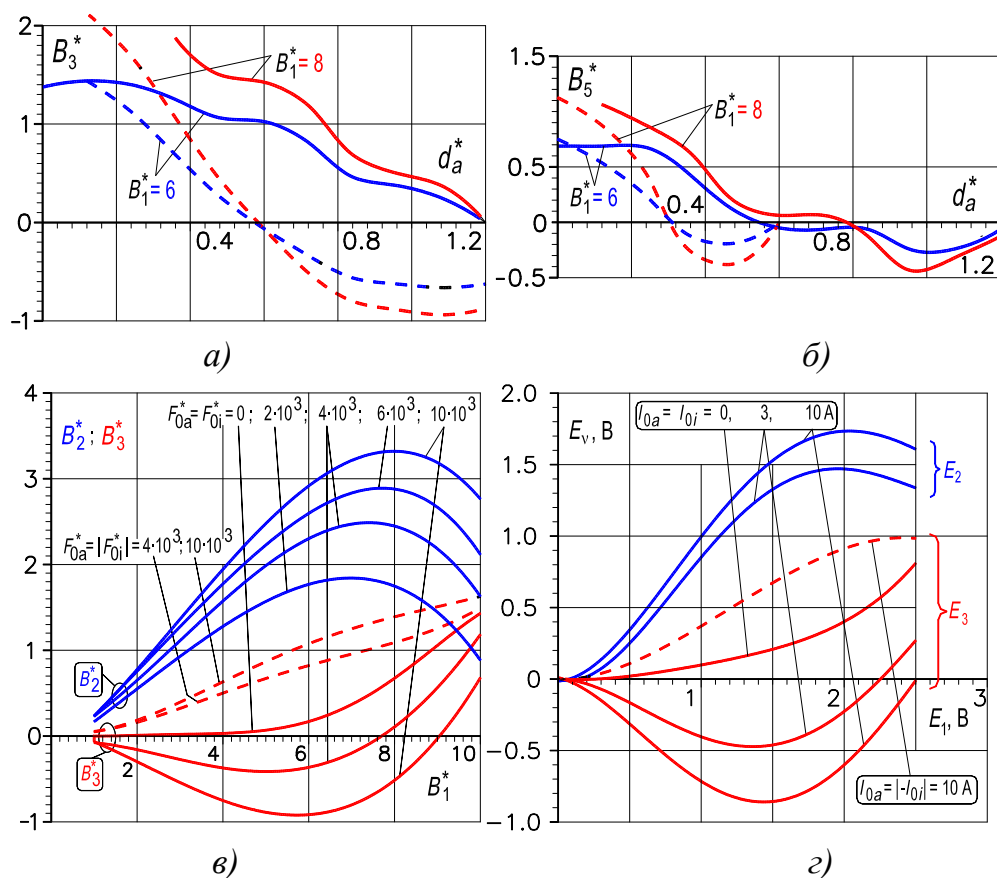
$$\begin{aligned}
 & -\sum_{\mu} F_{\mu}^* p_{\mu} \sin(\omega_{\mu} t - p_{\mu} \gamma + \xi_{\mu}) + \frac{F_{0a}^*}{\pi} \mp \frac{F_{0i}^*}{\pi} = \\
 & = -2\{\text{Sh}[B_{0a}^* + \sum_{\nu} B_{\nu}^* \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu})] + \\
 & + k_s \text{Sh}[\mp B_{0a}^* + \sum_{\nu} B_{\nu}^* \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu})] + \\
 & + L_{za}^* d_a^* \sum_{\nu} B_{\nu}^* p_{\nu}^2 \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) \text{Ch} d_a^* B_{\nu}^* p_{\nu} \cos(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) + \\
 & + L_{zi}^* d_i^* \sum_{\nu} B_{\nu}^* p_{\nu}^2 \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) \text{Ch} d_i^* B_{\nu}^* p_{\nu} \cos(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) + \\
 & + \delta^* \sum_{\nu} B_{\nu}^* p_{\nu}^2 \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu})\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

В уравнении (1) отношения

$$\begin{aligned}
 F_{\mu}^* & = F_{\mu} / \alpha R_{as}; \quad F_{0a}^* = F_{0a} / \alpha R_{as}; \quad F_{0i}^* = F_{0i} / \alpha R_{as}; \quad B_{\nu}^* = \beta B_{\nu} \\
 L_{za}^* & = L_{za} / R_{as}; \quad L_{zi}^* = L_{zi} / R_{as}; \quad d_a^* = \frac{2\pi h_{ac}}{Z_1 b_{z1p}}; \quad d_i^* = \frac{2\pi h_{ic}}{Z_2 b_{z2p}}; \quad (2)
 \end{aligned}$$

$k_s = R_{is}/R_{as}$ ;  $\delta^* = \delta h_{ac}/\alpha\beta\mu_0 R_{a1} R_{as}$  – безразмерные величины.

Последнее позволяет применять уравнение (1) не только для анализа различных режимов намагничивания утроителя с вращающимся магнитным полем, но и использовать значения безразмерных величин при проектировании утроителей с различными номинальными данными. Для решения (1) разработан алгоритм и в соответствии с ним составлена программа. При этом учтены немагнитный зазор между статором и ротором, зубцово-пазовые слои, а также все гармоники насыщения до 7-й включительно (увеличение числа учитываемых гармоник не приводит к изменению алгоритма). Программа реализует совокупность численных методов Давиденко и Рунге-Кутты. Далее приводится графическая интерпретация результатов решения (1), выполненного на ПК.



**Рисунок 2 – Зависимость амплитуд гармоник магнитной индукции:**  
 а) и б) – 3 и 5-я гармоники в зависимости от коэффициента поперечной геометрии  $d_a^*$  ( $p_1 = 1$  – сплошные линии,  $p_1 = 2$  – пунктирные); в) – 2 и 3-я гармоники в режимах вынужденного намагничивания (сплошные линии) и симметричного – пунктирные; г) – экспериментальные аналоги расчётных зависимостей в)

Из анализа следует: утроитель частоты обладает лучшими характеристиками в режиме симметричного намагничивания при  $p_1 = 1$  и коэффициенте  $d_a^* \approx 0,6$ , что согласуется с данными экспериментальных исследований.

### Библиографический список

1. Забудский, Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов / Е.И Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2018. – 356 с. <http://zabudsky.ru>