

УДК 621.313.32

УПРАВЛЯЕМЫЙ ДРОССЕЛЬ-ТРАНСФОРМАТОР В СТРУКТУРЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ

С.В. МИШИН

Статья представлена доктором технических наук, профессором Кузнецовым С.В.

В статье кратко описана конструкция управляемого дроссель-трансформаторного регулятора. Представлена электрическая схема и результаты его лабораторных испытаний в виде характеристик холостого хода, короткого замыкания и рабочих характеристик. Обоснована целесообразность применения такого устройства в электромеханической системе генерирования переменного тока постоянной частоты.

Ключевые слова: привод-генераторный агрегат, электромеханическая система генерирования, переменный ток постоянной частоты, управляемый дроссель-трансформатор, подмагничивание магнитопровода.

В силу получившей развитие концепции «полностью электрического самолета» и известных недостатков турбомеханических и гидромеханических привод-генераторных агрегатов (ПГА) представляет интерес исследование электромеханического ПГА как перспективного источника электроэнергии переменного тока постоянной частоты. Учитывая, что анализ режимов работы и характеристик ряда модификаций электромеханических ПГА уже рассмотрен в научно-технической литературе [1; 2; 3], целью данной работы является освещение принципиально новых моментов теории дифференциального асинхронно-синхронного ПГА с дроссель-трансформаторным регулятором.

Принципиальную новизну в рассматриваемой схеме дифференциального асинхронно-синхронного ПГА (рис. 1) представляет управляемый дроссель-трансформатор (УДТ) – статическое электромагнитное устройство, реализующее комбинированный принцип регулирования напряжением питания асинхронной машины агрегата (рис. 2).

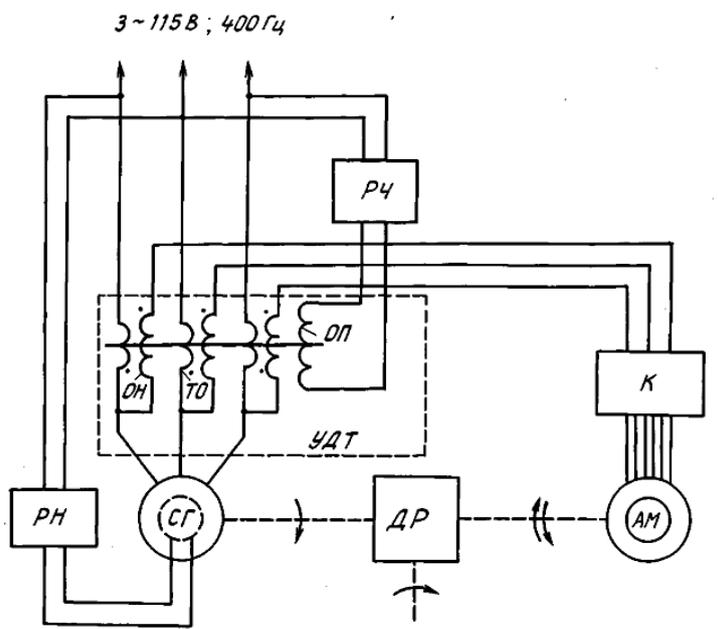


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема дифференциального асинхронно-синхронного привод-генераторного агрегата с управляемым дроссель-трансформаторным регулятором

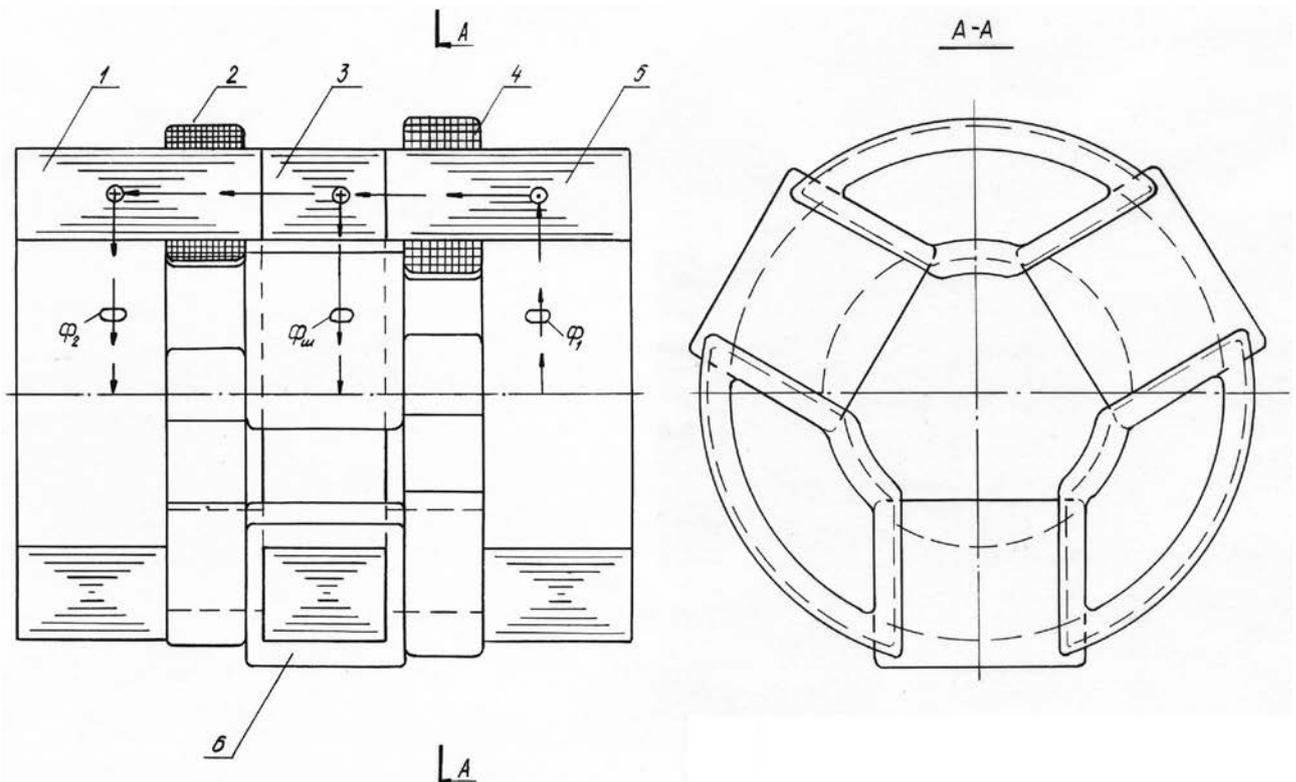


Рис. 2. Конструктивный чертеж управляемого дроссель-трансформатора:

1 – ярмо токовой обмотки составного магнитопровода, имеющее прямоугольные открытые пазы на правом торце; 2 – катушка трехфазной токовой обмотки; 3 – витой полый цилиндр, выполняющий роль магнитного шунта; 4 – катушка трехфазной обмотки напряжения; 5 – ярмо обмотки напряжения составного магнитопровода, имеющее прямоугольные открытые пазы на левом торце; 6 – катушка тороидальной обмотки подмагничивания шунта

Как видно на рис. 2, все элементы магнитопровода УДТ выполняются витыми из ленточной трансформаторной стали и имеют одинаковые наружные и внутренние диаметры, числа и размеры пазов на соприкасающихся торцевых поверхностях. Радиальные прямоугольные пазы на торцах опытного образца УДТ были выполнены путем фрезерования. При серийном производстве таких магнитопроводов возможно совмещение выштамповывания пазов и процесса навивки. Такая технология изготовления позволит существенно снизить потери электротехнической стали в виде отходов по сравнению с изготовлением шихтованных из отдельных листов магнитопроводов электрических машин.

Катушки токовой и обмотки напряжения располагаются на зубцах соответствующих ярем, обмотка подмагничивания – на магнитном шунте (рис. 2).

Электрическое соединение обмоток УДТ выполняется в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1: токовая обмотка (ТО) включается на выход синхронного генератора (СГ) последовательно с электрической нагрузкой, обмотка напряжения (ОН) – последовательно в цепь рабочей обмотки асинхронной машины (АМ). Между собой одноименные катушки ТО и ОН соединяются таким образом, чтобы их магнитодвижущие силы (МДС) были сдвинуты по фазе на угол, близкий к 180° . Путь прохождения средних линий вращающегося магнитного поля, создаваемого МДС рабочих обмоток УДТ, показан пунктирной линией со стрелками (рис. 2).

Увеличение тока в ТО УДТ до определенной величины ведет к ослаблению суммарного магнитного потока, а следовательно, и противоэдс в ОН. Это обуславливает

пропорциональное (зависящее от соотношения токов в рабочих обмотках УДТ и чисел их витков) увеличение напряжения на ее выходе. Дальнейший же рост тока в ТО приводит к преобладанию ее МДС над МДС ОН, то есть изменению знака противоэДС, а значит, и росту выходного напряжения ОН над его входным значением. Далее по тексту этот режим будем называть «вольтодобавкой».

Однако компаундирование не может обеспечить точную реализацию требуемого закона изменения напряжения на выходе ОН УДТ. Добиться этого позволит изменение тока в обмотке подмагничивания УДТ. Так, например, при увеличении тока подмагничивания происходит рост магнитного сопротивления шунта и вытеснение магнитного потока в ярмо обмотки напряжения, то есть возрастает коэффициент магнитной связи рабочих обмоток УДТ. При уменьшении тока подмагничивания картина меняется на противоположную. Таким образом, обеспечивается точная реализация закона изменения напряжения на выходе ОН УДТ в функции величины и характера тока нагрузки.

Основные размеры и параметры исследуемого макета УДТ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра (размера)	Значение и характеристика
Наружный диаметр магнитопровода, мм	128,0
Внутренний диаметр магнитопровода, мм	80,0
Ширина паза, мм	52,0
Высота зубца, мм	24,5
Высота ярма, мм	38,5
Высота магнитного шунта, мм	31,5
Длина средней линии кольцевого магнитопровода, мм	327,0
Число зубцов ярма	3
Число витков катушки ОП	78
Число витков катушки ОН	20
Число витков катушки ТО	12
Материал магнитопровода	Ленточная электротехническая сталь толщиной 0,2 мм
Воздушный зазор	Минимальный по технологическим условиям
Тип и размеры провода ОН и ТО, мм	ПЭВ-2 1,0×2,63
Тип и диаметр провода ОП, мм	ПЭВ-2 1,2
Омическое сопротивление катушки ОН при 20°C, Ом	0,052
Омическое сопротивление катушки ТО при 20°C, Ом	0,04

Экспериментальные исследования макетного образца УДТ проводились по электрической схеме, представленной на рис. 3. Первоначально рассматривались характеристики холостого хода УДТ при отключенной нагрузке в цепи ТО (выключатель SA1 разомкнут) и питании обмотки подмагничивания от внешнего источника постоянного тока напряжением 30В (рис. 4).

Из рассмотрения приведенных на рис. 4 характеристик хорошо видно, что при подмагничивании магнитного шунта постоянным током (I_{Π}) уменьшается величина падения напряжения на фазах ОН ($\Delta U_{\Phi}^{ДР}$) и пропорционально возрастает их выходное напряжение ($U_{\Phi}^{ОН}$). Это объясняется тем, что при подмагничивании шунта происходит вытеснение из него рабочего магнитного потока в токовое ярмо. Поэтому возрастает суммарная длина магнитных силовых линий и магнитное сопротивление этому потоку, обуславливающее его ослабление. Как результат – представленные на рис. 4 закономерности. Кроме того,

насыщение магнитного шунта вызывает увеличение реактивного тока и пропорциональное снижение коэффициента мощности ОН ($\cos\varphi_{\text{ОН}}$).

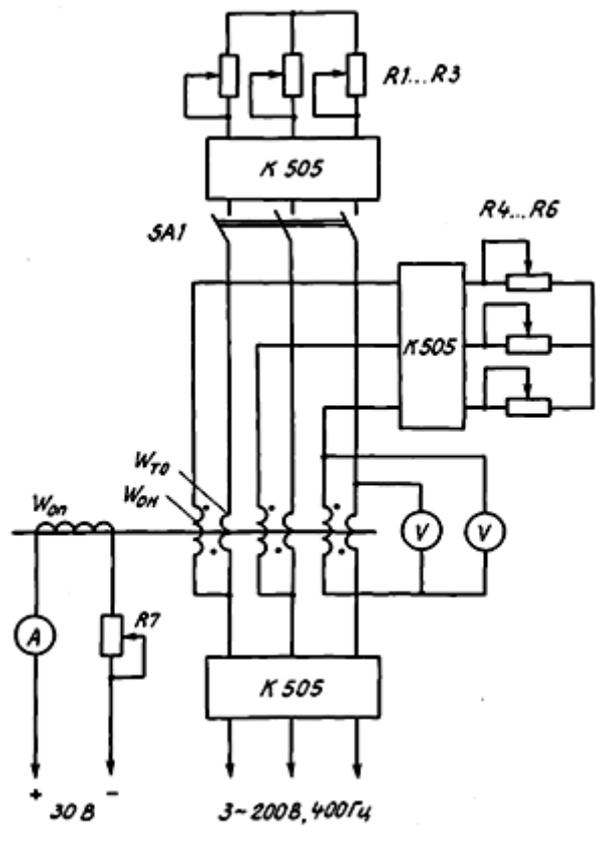


Рис. 3. Электрическая схема для проведения исследований УДТ

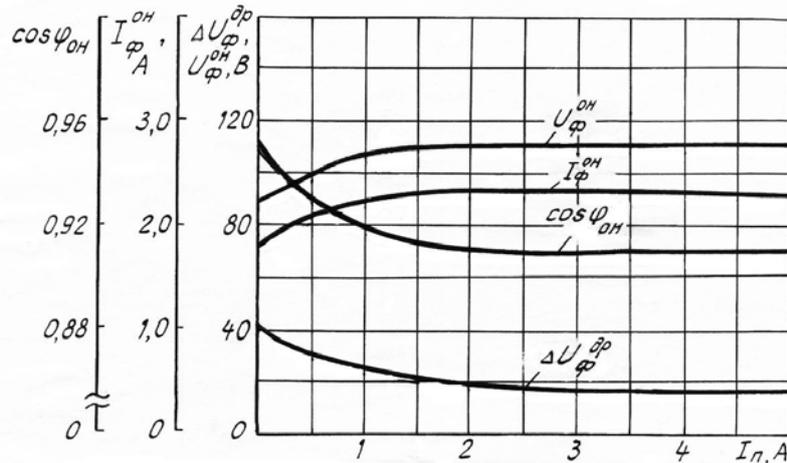


Рис. 4. Результаты исследования УДТ на холостом ходу

На рис. 5 приведены характеристики короткого замыкания УДТ (при замкнутых накоротко фазах ТО) в функции тока подмагничивания. Полученные результаты могут быть полезны при разработке и построении схемы замещения исследуемого устройства.

На заключительном этапе исследований было получено семейство рабочих характеристик УДТ – зависимостей падения напряжения на его фазах $\Delta U_{\varphi}^{\text{др}}$ и напряжения на его выходе $U_{\varphi}^{\text{ОН}}$ в функции сопротивления нагрузки на выходе обмотки напряжения $R_{\varphi}^{\text{ОН}}$ (рис. 6). Исследования

проводились при фиксированных значениях тока подмагничивания и тока в цепи токовой обмотки. Анализ этих характеристик позволяет выявить закономерность: увеличение тока подмагничивания вызывает пропорциональный рост коэффициента магнитной связи рабочих обмоток УДТ (происходит вытеснение магнитного потока из шунта в рабочие ярма) таким образом, что выходное напряжение ОН по мере увеличения тока нагрузки постепенно возрастает и при соотношении МДС ТО и ОН $F_{ТО}/F_{ОН} \approx 1,1$ УДТ переходит в режим «вольтодобавки». В этом случае рабочий магнитный поток меняет свой знак на противоположный (аналогично ведет себя и падение напряжения на ОН).

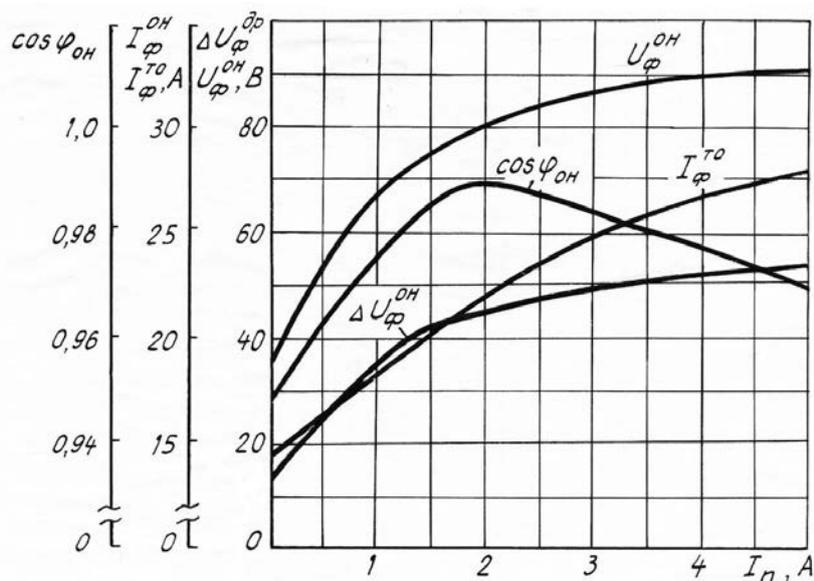


Рис. 5. Результаты исследования УДТ в режиме короткого замыкания

Подобное двухзонное регулирование позволяет существенно расширить диапазон изменения напряжения на выходе ОН. Так в экспериментальном макете, несмотря на неоптимальный выбор геометрии магнитопровода УДТ и соотношения чисел витков ОН и ТО, этот диапазон достигает $U_{\varphi \text{ МАКС}}^{ОН} / U_{\varphi \text{ МАКС}}^{ОН} \approx 2$.

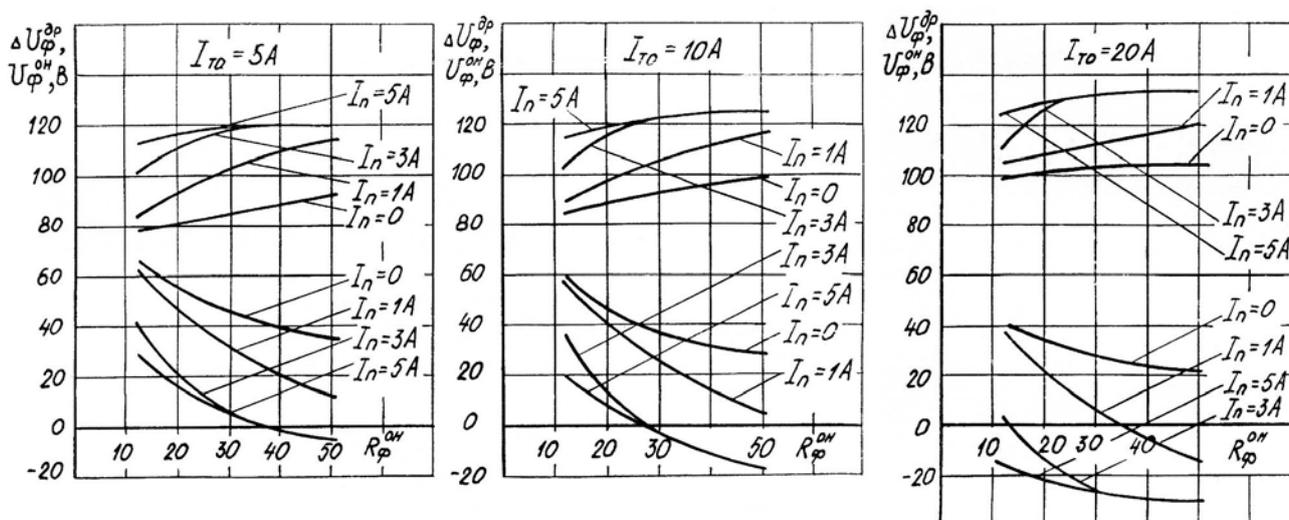


Рис. 6. Результаты исследования УДТ под нагрузкой

Представленный в работе управляемый дроссель-трансформатор при его использовании в структуре электромеханического ПГА позволяет сохранить работоспособность агрегата даже в случае возникновения трехфазного короткого замыкания на зажимах генератора. В этом случае необходимый уровень напряжения на асинхронную машину будет подаваться за счет наличия магнитной связи между его рабочими обмотками.

Данные, полученные в результате исследований лабораторного макета УДТ, количественно подтверждают принципиальную справедливость всех положений, описывающих принцип действия УДТ и обоснованность его выбора в качестве регулятора в схеме дифференциального асинхронно-синхронного ПГА.

Методика разработки математической модели с целью более глубокого и подробного исследования подобного электромагнитного устройства была рассмотрена ранее [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Красношопка М.М. *Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты*. Киев: Техника, 1974. 168 с.
2. Мишин С.В., Голованов И.Г. Проблемы генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты на современных воздушных судах // *Научный Вестник МГТУ ГА, серия Авионика и электротехника*. 2007. № 115. С. 132-135.
3. Мишин С.В., Мишина И.В. Особенности рабочих процессов в системах генерирования переменного тока постоянной частоты // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2012. № 185. С. 138-145.
4. Мишин С.В., Мишина И.В. Математическое моделирование управляемого трансформатора с вращающимся магнитным полем // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2008. № 126. С. 87-91.

THE CONTROLLED CHOKE TRANSFORMER IN THE STRUCTURE OF THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM FOR GENERATING ALTERNATING CURRENT OF FIXED FREQUENCY

Mishin S.V.

This article briefly describes the design of controlled choke transformer regulator. The electrical circuit and the results of laboratory tests in the form of characteristics of idling, short circuit and performance are presented. The expediency of application of such devices in the electromechanical system of generating alternating current of constant frequency is grounded.

Keywords: actuator-generator unit, an electromechanical system of generating, alternating current of constant frequency, controlled choke transformer, the magnetization of the magnetic circuit.

REFERENCES

1. Krasnoshapka M.M. *Generatory peremennogo toka stabil'noy i reguliruyemoy chastoty*. Kiyev: Tekhnika. 1974. 168 p. (In Russian).
2. Mishin S.V., Golovanov I.G. Problemy generirovaniya elektricheskoy energii pe-remenogo toka postoyannoy chastoty na sovremennykh vozdushnykh sudakh. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA, seriya Avionika i elektrotekhnika*. 2007. № 115. Pp.132-135. (In Russian).
3. Mishin S.V., Mishina I.V. Osobennosti rabochikh protsessov v sistemakh generirovaniya peremennogo toka postoyannoy chastoty. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2012. № 185. Pp. 138-145. (In Russian).
4. Mishin S.V., Mishina I.V. Matematicheskoe modelirovanie upravlyaemogo transformatora s vrashhajushhimsja magnitnym polem. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2008. № 126. Pp. 87-91. (In Russian).

Сведения об авторе

Мишин Сергей Владимирович, 1960 г.р., окончил КВВАИУ (1980), доцент, кандидат технических наук, декан факультета авиационных систем и комплексов Иркутского филиала МГТУ ГА, автор более 30 научных работ, область научных интересов – генерирование и преобразование электрической энергии переменного и постоянного тока.