

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-625880>

Оригинальное исследование



К вопросу о бесконтактных генераторах переменного тока на подвижных объектах

Е.А. Рябых, Р.А. Малеев, А.В. Акимов

Московский политехнический университет, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В данной статье рассматриваются автотракторные индукторные генераторы отечественного и зарубежного производства с различной мощностью и конструктивным исполнением. Проведён сравнительный анализ индукторных генераторов по основным электромагнитным показателям и конструктивным исполнениям. По результатам сравнительного анализа сделаны выводы о конкурентоспособности отечественных индукторных генераторов и превосхождении над зарубежными аналогами.

Цель работы — исследование и сравнительный анализ тракторных индукторных генераторов с целью определения оптимальной конструкции, а также основных характеристик и параметров.

Материалы и методы. Расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода основан на методе последовательных приближений с помощью итераций. Для расчёта токоскоростной характеристики применяется известная методика с использованием диаграммы Blondеля.

Результаты. Проведён обзор и сравнительный анализ автотракторных индукторных генераторов отечественного и зарубежного производства, с различными магнитными системами и конструктивным исполнением. Определены преимущества и недостатки магнитной цепи индукторных генераторов как отечественного, так и зарубежного производства, которые отображены в сравнительных таблицах и токоскоростных характеристиках. Для проведения расчёта была выбрана оптимальная конструкция индукторного генератора с наиболее эффективными технико-экономическими показателями.

Заключение. Проведён расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода трёхфазного одноименнополюсного, однопакетного индукторного генератора 11.3701 с классической зубцовой зоной и двухполупериодным выпрямителем. Расчёт токоскоростной характеристики выполнен по известной методике с использованием диаграммы Blondеля методом последовательных приближений.

Ключевые слова: вентильный индукторный генератор; постоянные магниты; магнитная проницаемость; воздушный зазор; токоскоростная характеристика.

Как цитировать:

Рябых Е.А., Малеев Р.А., Акимов А.В. К вопросу о бесконтактных генераторах переменного тока на подвижных объектах // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 1. С. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-625880>

Рукопись получена: 22.01.2024

Рукопись одобрена: 01.03.2024

Опубликована online: 30.03.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-625880>

Original Study Article

On the issue of contactless alternators on movable objects

Evgeny A. Ryabykh, Ruslan A. Maleev, Andrey V. Akimov

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: This article discusses automotive inductor alternators of domestic and foreign production with different power and design. A comparative analysis of inductor alternators according to the main electromagnetic parameters and design is carried out. Based on the results of the comparative analysis, conclusions are drawn about the competitiveness of domestic inductor alternators and their superiority over foreign analogues.

AIM: Research and comparative analysis of tractor inductor alternators in order to determine the optimal design, as well as the main characteristics and parameters.

METHODS: The calculation of the magnetic circuit and the idling characteristic is based on the method of successive approximations using iterations. A well-known method with the Blondel diagram is used to calculate the current-speed curve.

RESULTS: A review and comparative analysis of automotive inductor alternators of domestic and foreign production, with various magnetic systems and design, is carried out. The advantages and disadvantages of the magnetic circuit of inductor alternators of both domestic and foreign production are determined and given in comparative tables and current-speed curves. The optimal design of the inductor alternator with the most effective technical and economic indicators was chosen to perform the calculation.

CONCLUSIONS: The calculation of the magnetic circuit and idling characteristics of the 11.3701 three-phase single-pole, single-pack inductor generator with a classical toothed zone and a two-half-period rectifier is carried out. The calculation of the current-velocity curve was performed using the well-known method with the Blondel diagram and the method of successive approximations using iterations.

Keywords: brushless inductor alternator; permanent magnets; permeability; air gap; current-velocity curve.

To cite this article:

Ryabykh EA, Maleev RA, Akimov AV. On the issue of contactless alternators on movable objects. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(1):53–62.

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-625880>

Received: 22.01.2024

Accepted: 01.03.2024

Published online: 30.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Преимуществами генераторов с постоянными магнитами являются технологичные и простые конструкции, низкие потери, экономия обмоточной меди, а также такие генераторы не требуют создания отдельного источника питания. К недостаткам можно отнести сложность регулирования напряжения при переменных скоростях вращения и нагрузках.

Задачу повышения надёжности и долговечности тракторного электрооборудования с 2000–3000 моточасов до 4000–5000 моточасов можно было решить тремя путями: создание новых генераторов постоянного тока, применение генераторов переменного тока с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением [1].

Разработанные генераторы с постоянными магнитами (ГТ1А; 573.00017 и др.) не отвечали требованиям к перспективным тракторным генераторам (по условиям компоновки и электрическим характеристикам). Поэтому задача создания генератора с повышенной надёжностью и долговечностью была решена путём создания бесконтактного генератора переменного тока с электромагнитным возбуждением. Надёжность такого генератора была значительно выше, т. к. в нём отсутствовал щёточно-коллекторный узел, поэтому долговечность генератора определялась в основном долговечностью подшипникового узла. Необходимо было создать генератор, обеспечивающий наилучшую экономичность, максимально простой по конструкции, технологичный [2].

Бесконтактные генераторы с электромагнитным возбуждением могут быть выполнены как с обмоткой на роторе (генератор с вращающимся выпрямителем), так и без них. Последние являются надёжными, экономичными, эти генераторы делятся на альтернативные и пульсационные.

У первых индукция в каждой точке статора меняется по величине и по направлению, и физические процессы в них аналогичны синхронным машинам с контактными кольцами. Примером такого генератора является генератор с когтеобразным ротором. Недостатком этого генератора является конструктивная и технологическая стоимость изготовления ротора.

У генераторов пульсационного типа (индукторных) индукция в каждой точке расточки статора изменяется во времени только по величине, не меняя направления. Этот тип машин позволяет создать более простые и надёжные конструкции, несмотря на худшее использование магнитного потока [3].

Индукторные машины делятся:

- 1) с аксиальным потоком (одноимённополюсные);
- 2) с радиальным потоком (разноимённополюсные).

Вторые проще в конструктивном исполнении, т. к. все обмотки расположены на статоре и нет необходимости проводить поток возбуждения через вал и крышки. Но расход обмоточного материала в таких генераторах

значительно больше. Основной расход обмоточного материала приходится на обмотку возбуждения (пропорционально квадрату средней линии длины витка).

В генераторах с аксиальным потоком имеется возможность приблизить обмотку возбуждения к оси машины и тем самым уменьшить среднюю длину витка и уменьшить расход материала.

Вынесенная обмотка возбуждения позволяет полностью использовать расточку статора для размещения статорной обмотки, что увеличивает объём активной зоны якоря и электромагнитную мощность машины, т. е. при той же мощности можно уменьшить наружный диаметр корпуса.

Эти преимущества заставили отдать предпочтение бесщёточным генераторам с аксиальным потоком [6].

Индукторные генераторы с аксиальным потоком имеют исполнение: двухпакетные и однопакетные.

У двухпакетных генераторов обмотка возбуждения размещена между двумя пакетами статора и ротора. Двухпакетная конструкция сложна конструктивно и технологически. Главный её недостаток в том, что в генераторе без протяжной вентиляции обмотка возбуждения находится в неблагоприятных условиях с точки зрения теплоотвода.

Однопакетные генераторы проще конструктивно. Они также позволяют уменьшить длину витка обмотки возбуждения (ОВ) за счёт её приближения к оси машины. В этих генераторах обмотка возбуждения в крышке генератора, где имеются благоприятные условия для охлаждения.

Тракторные генераторы имеют закрытое исполнение. Магнитопровод в значительной части совмещён с конструктивными деталями, что позволяет получить хорошее использование генератора по весу [5].

Основные показатели использования индукторных генераторов определяются правильным выбором параметров зубцовой зоны.

Используется два вида зубцовых зон:

- 1) классическая;
- 2) гребенчатая.

Гребенчатая зубцовая зона позволяет увеличить частоту и, следовательно, уменьшить вес рабочей обмотки. Результаты исследования показывают, что максимальное использование машины получается при соотношении:

$$\tau = (40 \div 60)\delta,$$

где τ — величина полюсного деления; δ — величина одностороннего воздушного зазора.

Исходя из конструктивных и технологических соображений выбирают $\delta = 0,35 \div 0,4$ мм и следовательно, $\tau = 15 \div 25$ мм. Величина наружного диаметра ограничена, поэтому оптимальной в этом случае является классическая зубцовая зона. Уменьшение частоты в конструкции с гребенчатой зоной компенсируется более выгодным характером кривой изменения во времени магнитной

проводимости между зубцами ротора и статора. По сравнению с гребенчатой зубцовой зоной увеличивается амплитуда пульсации магнитного потока (отношение переменной составляющей потока холостого хода в зубце статора к постоянной составляющей). Одноимённополюсные машины могут выпускаться как однофазные, так и многофазные. Вопрос выбора оптимальной фазности связан со схемой выпрямителя и рядом других требований и поэтому трёхфазная система более удобна с точки зрения условий регулирования напряжения. Высокое использование обмотки якоря и способность самоограничения по току возможны при двухполупериодном выпрямлении тока [4].

Исходя из вышеизложенного в качестве оптимального тракторного генератора выбрали трёхфазный индукторный генератор, одноимённополюсный, однопакетный, с классической зубцовой зоной, с двухполупериодным выпрямителем.

Генератор имеет 16 полюсов. Питание потребителей – через встроенный выпрямитель, собранный по мостовой схеме на девяти диодах. Подшипники имеют возможность получать добавочную смазку через специальные маслёрки.

Из-за сложности регулирования напряжения при переменных частотах вращения и нагрузках бесконтактные генераторы с постоянными магнитами применяются там, где допускается широкий диапазон изменения выходного напряжения. Постоянство напряжения поддерживается параметрическим регулированием. Генераторы этого типа впервые начали выпускать в СССР (Г30, Г46, Г303). В дальнейшем на тракторах появились АБ, это потребовало применения принудительной регулировки напряжения, т. к. увеличились требования к диапазону выходного напряжения. Появились генераторы с параметрическим регулированием напряжения (ГТ-1А), генераторы с управляемым выпрямителем (Ducati, Италия) и т. д. [5].

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ТРАКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА ГЕНЕРАТОРА (ГЕНЕРАТОРЫ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ)

Индукторные генераторы фирмы Niehoff (США) (рис. 1) являются одноимённополюсными пульсационными генераторами с внешнезамкнутым магнитным потоком.

Практически все индукторные генераторы относятся к этому типу. За рубежом также применяются в основном генераторы такого типа. Например, фирма Niehoff выпускает серию индукторных машин на 6, 12, 24, 32 В. Все генераторы фирмы однотипны по конструкции и предназначены для работы в тяжёлых условиях эксплуатации (пыль, грязь, песок, вода, пары горюче-смазочных материалов и широкий диапазон изменения температуры окружающей среды). Генератор имеет корпус в виде трубы, в которой

вставлен пакет статора. Зубцовая зона аналогична генератору Г306. Зубцы пакета ротора для улучшения формы выходного напряжения и уменьшения магнитного шума имеют скос под углом 45° до середины пакета и затем тот же скос в противоположную сторону. Однако при этом мощность генератора снижается на 30%.

Втулка обмотки возбуждения, закреплённая в передней крышке генератора, входит во внутреннюю полость пакета ротора. При этом магнитный поток (основной) переходит непосредственно из втулки в пакет ротора, минуя вал, что улучшает весовое использование генератора.

Охлаждение генератора осуществляется собственным вентилятором, для прохождения воздуха имеются вентиляционные окна в крышках.

Генератор серии А-2-125 представляет собой объединённую конструкцию стандартных генераторов, соединённых между собой с помощью промежуточного стопорного кольца и кулачковой муфты. Генератор состоит из двух статоров с 3-х фазной обмоткой, стальных крышек с двумя выпрямительными узлами, соединёнными параллельно, и двух роторов со звёздочкой индуктора, соединённых между собой с помощью кулачкового зацепления через промежуточную резиновую прокладку. Обмотка возбуждения генератора в холодном состоянии имеет низкое сопротивление ($R=1,6 \text{ Ом}$).

Индукторные генераторы фирмы Gallo (Италия) являются разноимённополюсными пульсационными генераторами с внешнезамкнутым магнитным потоком.

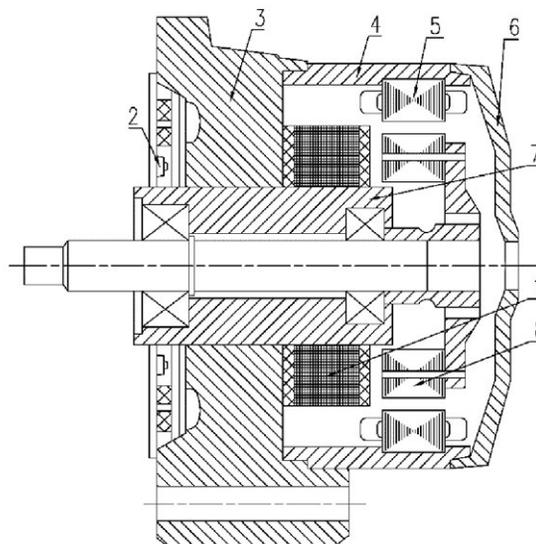


Рис. 1. Схематический разрез генератора Niehoff: 1 — обмотка возбуждения, 2 — диоды выпрямителя, 3 — передняя крышка, 4 — корпус, 5 — пакет статора с обмоткой, 6 — задняя крышка, 7 — втулка, 8 — ротор.

Fig. 1. A schematic section of the Niehoff alternator: 1 — an excitation winding; 2 — rectifier diodes; 3 — a front cap; 4 — a housing; 5 — a pack of a stator with winding; 6 — a rear cap; 7 — a bushing; 8 — a rotor.

Фирма Gallo выпускает для грузового транспорта тяжёлого режима работы «супергенератор кондор», который представляет собой многополярную индукторную машину с ровным зубцовым шагом статора и ротора (машина Гюи). Машина имеет относительно малый внешний диаметр.

По конструкции машина приближена к генераторам постоянного тока. Она имеет корпус, изготовленный из трубы, к которой прикреплены четыре полюса, похожие на полюсы генераторов постоянного тока, но несущие на себе, кроме обмотки возбуждения, обмотку статора, расположенную в специальных пазах. На каждом полюсе расположены две катушки возбуждения: серийная и шунтовая. Все серийные катушки включены параллельно, шунтовые последовательно.

Недостатком генератора является то, что выходное напряжение при изменении нагрузки стабилизировано только за счёт подмагничивающего эффекта серийной обмотки. Также стабилизация мало эффективна.

Motorola (США) выпускает индукторные генераторы с вращающимся выпрямителем.

Установки этой фирмы предназначены для работы в тяжёлых условиях. Они выпускались как модели серии SB.

Особенность генераторов этой серии — наличие в нём трансформатора, вторичная обмотка которого закреплена на валу ротора и вращается вместе с ним. Напряжение со вторичной обмотки подаётся на выпрямитель, вращающийся вместе с ротором, и подводится к обмотке возбуждения, расположенной между полюсными половинами. Переменное напряжение высокой частоты подаётся в первичную обмотку трансформатора от генератора высокой частоты, входящего в регулятор напряжения (РН). Установка имеет пятипозиционный переключатель, позволяющий изменять уровень напряжения регулятора. Максимальная частота вращения 6000 мин^{-1} .

Генераторы с вращающимся выпрямителем фирмы BOSCH (Германия).

Примером таких генераторов является генератор T4 (рис. 2). Срок службы генератора определяется сроком службы подшипников и составляет 300 000 км.

Генератор имеет возбудитель в виде синхронной машины. Обмотка якоря подвозбудителя с выпрямителем и регулирующим устройством закреплены на корпусе машины. Обмотки ротора возбудителя через вращающийся выпрямитель питает обмотку возбуждения генератора, расположенную между когтеобразными полюсными наконечниками.

АКСИАЛЬНЫЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ОДНОПАКЕТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ (ГЕНЕРАТОРЫ С КОГТЕОБРАЗНЫМ РОТОРОМ)

Рассмотрим аксиальные генераторы фирмы Delco Remy (США). Использование в бесконтактном генераторе когтеобразной магнитной системы объясняется стремлением

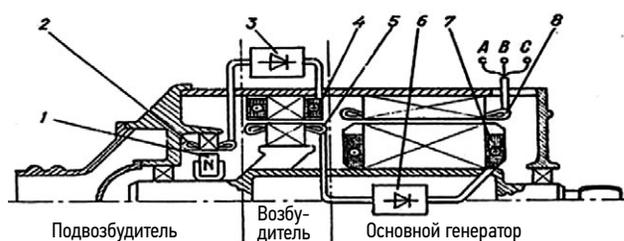


Рис. 2. Конструкция генератора с вращающимся выпрямителем: 1 — постоянные магниты индуктора подвозбудителя; 2 — обмотка якоря подвозбудителя; 3 — выпрямительное и регулирующее устройства; 4 — обмотка возбуждения индуктора возбудителя; 5 — обмотка якоря возбудителя; 6 — вращающиеся выпрямители; 7 — обмотка возбуждения индуктора основного генератора; 8 — обмотка якоря основного генератора; 9 — центробежный вентилятор.

Fig. 2. Design of an alternator with a rotating rectifier: 1 — permanent magnets of a subexciter inductor; 2 — a winding of a subexciter armature; 3 — rectifying and controlling devices; 4 — an excitation winding of an exciter inductor; 5 — a winding of an exciter armature; 6 — rotating rectifiers; 7 — an excitation winding of an inductor of the main alternator; 8 — a winding of an armature of the main alternator; 9 — a centrifugal fan.

приблизить конструкцию бесконтактного генератора к традиционному автомобильному.

Электромашин такого типа начиная с 50-х годов выпускает фирма Delco Remy (США). Сначала был выпущен генератор Delcotron с когтеобразными полюсами и консольным ротором. Генератор имеет встроенный выпрямитель и РН, а также масляную охлаждающую систему, подсоединённую к общей системе смазки ДВС. В дальнейшем фирма отказалась от консольного исполнения ротора, одновременно применив вытяжную вентиляцию.

На рис. 3 показан эскиз магнитной цепи одного из генераторов фирмы Delco Remy серии 30-si тип 400 модели 1117481, 12 В, 90А. Генератор имеет встроенный выпрямитель, трансформаторно-выпрямительный блок и интегральный РН. Система возбуждения генератора представляет собой 16 полюсную систему. Полюсные половины прикреплены к кольцу из алюминиевого сплава. Одна из полюсных половин напрессована на вал ротора, другая — только висит в воздухе, поддерживаемая за когти алюминиевым кольцом. Внутри получившейся когтеобразной конструкции на вал напрессована магнитопроводящая втулка.

Аксиальные генераторы фирмы Marshall (Нидерланды). Генератор A 14/30 Fred предназначен для работы в системе электропитания $U_H = 14 \text{ В}$ и $I_H = 30 \text{ А}$, генератор имеет укороченные когти. Обмотка возбуждения отделена от вала ротора и подвешена к статору между полюсными половинами ротора с помощью алюминиевых держателей (рис. 4).

Магнитный поток под каждой половиной когтеобразного ротора пульсирует, т. е. изменение только

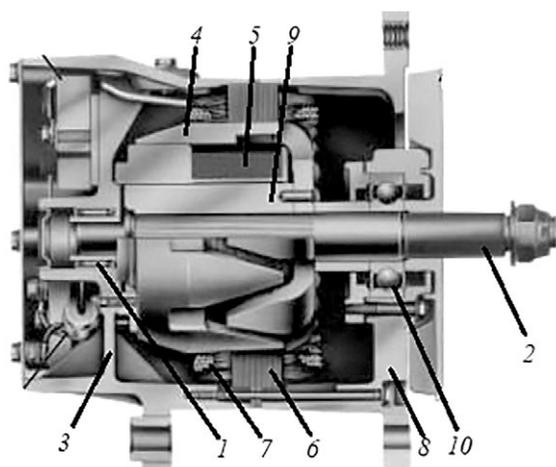


Рис. 3. Разрез генератора Delco Remy серии 30-si тип 400: 1 — игольчатый подшипник; 2 — вал; 3 — задняя крышка; 4 — полюса; 5 — обмотка возбуждения; 6 — статор; 7 — обмотка статора; 8 — передняя крышка; 9 — магнитопроводящая втулка; 10 — передний подшипник.

Fig. 3. Section of the Delco Remy 30 Si 400 alternator: 1 — a needle bearing; 2 — a shaft; 3 — a rear cap; 4 — poles; 5 — an excitation winding; 6 — a stator; 7 — a stator winding; 8 — a front cap; 9 — a magnetic conducting bushing; 10 — a front bearing.

по величине, но не по направлению. Поэтому такие генераторы относят к переходящим моделям от индукторных пульсационных к альтернативным машинам. По имеющимся данным, в этой конструкции удалось достигнуть по весовому использованию параметров генераторов с вращающейся обмоткой возбуждения. При этом магнитный поток увеличен на 50% по сравнению с генератором с контактными кольцами.

В табл. 1 представлен сравнительный анализ индукторных генераторов Delco Remy, Marshall, Motorola, Bosch.

Генераторы с управляемым выпрямителем фирмы Ducati (Италия). Генераторы такого типа выпускает Ducati, на разные мощности однофазного

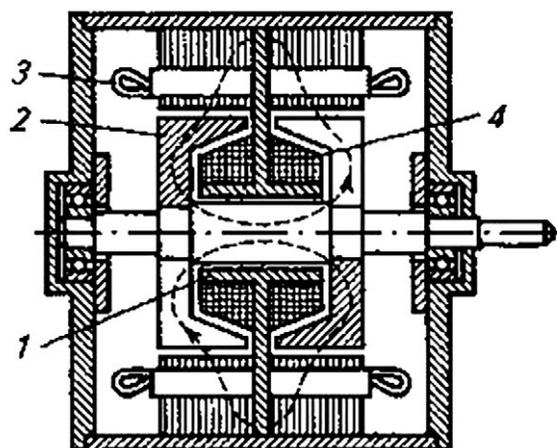


Рис. 4. Магнитная система генератора A 14/30 Fred Marshall: 1 — втулка обмотки возбуждения; 2 — полюсный наконечник; 3 — обмотка статора; 4 — обмотка возбуждения.

Fig. 4. Magnetic system of the Marshall Fred A 14/30 alternator: 1 — a bushing of an excitation winding; 2 — a pole tip; 3 — a stator winding; 4 — the excitation winding.

и трёхфазного напряжения. Регулирование в этих генераторах осуществляется управляемым выпрямителем на тиристорах с помощью РН. В табл. 2 представлен сравнительный анализ индукторного генератора Ducati с аналогами отечественного производства «Г303» и «ГТ-1А».

Токоскоростные характеристики рассмотренных выше генераторов как отечественного, так и зарубежного производства представлены на рис. 5 и 6.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА 11.3701

Индукторный генератор 11.3701 предназначен для работы в качестве источника электроэнергии

Таблица 1. Сравнительный анализ индукторных генераторов

Table 1. Comparative analysis of inductor alternators

Параметры генератора	Тип генератора			
	Delco Remy 30 Si 400	Marshall Fred	Motorola 8 SB 2001-R	Bosch T4
Номинальное напряжение, В	14	14	14	28
Максимальная мощность, Вт	1200	445	1250	1700
Расчётная мощность, Вт	800	310	750	1100
Частота вращения в расчётном режиме, мин ⁻¹	2000	2200	—	—
Вес генератора без шкива, кг	13,5	3,45	11	21
Удельный коэффициент использования в расчётном режиме, Вт/кг·мин ⁻¹	32	41	45	21
Удельная максимальная мощность, Вт/кг	88	129	114	82

Таблица 2. Параметры генераторов

Table 2. Properties of alternators

Параметры генератора	Величина		
	Г303	ГТ-1А	Ducati E-35.14.34
Номинальное напряжение, В	12	12	12
Номинальная мощность, Вт	180	300	325
Расчётная мощность, Вт	–	–	225
Частота вращения, соответствующая номинальной скорости ДВС, мин ⁻¹	3000	4000	–
Максимальная частота вращения, мин ⁻¹	400	4700	5000
Вес без шкива, кг	4,3	7	2,94
Удельная мощность, Вт/кг	42	43	110,5
Удельный коэффициент использования в расчётном режиме, Вт·мин·10 ³ /кг	–	–	32
Наружный диаметр статора, мм	116,5	130	112
Линейная нагрузка, А/мм	280	93	497
Вес активных материалов, кг	1,8	4,1	1,6
Вес обмоточной меди, кг	0,38	0,43	0,23

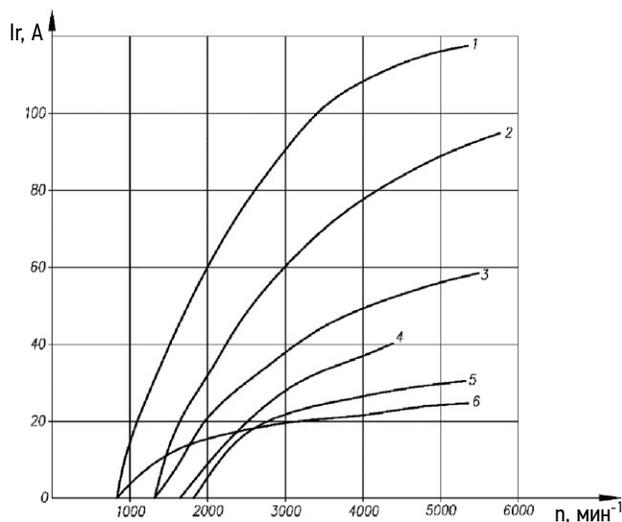


Рис. 5. Токоскоростные характеристики генераторов: 1 — Niehoff A-2-125; 2 — Г-309 (15.3701); 3 — Niehoff A-81-1; 4 — Gallo Condor; 5 — Г-306 (13.3701); 6 — Ducati E-35.14.34.01.

Fig. 5. Current-speed curves of alternators: 1 — the Niehoff A-2-125; 2 — the G-309 (15.3701); 3 — the Niehoff A-81-1; 4 — the Gallo Condor; 5 — the G-306 (13.3701); 6 — the Ducati E-35.14.34.01.

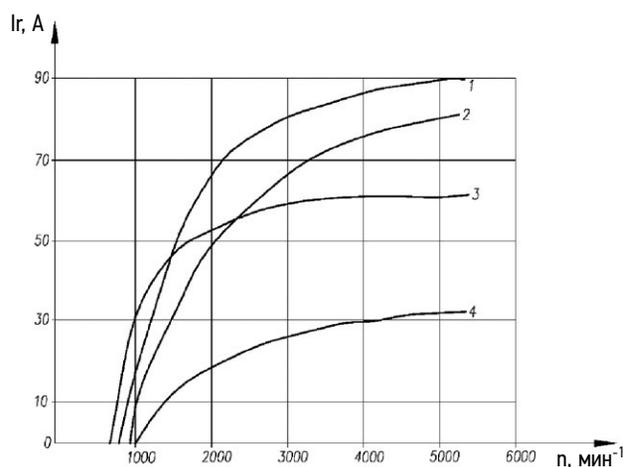


Рис. 6. Токоскоростные характеристики: 1 — Motorola 8SB2001-R; 2 — Delco Remy; 3 — Bosch T-4; 4 — Fred A-14/30.

Fig. 6. Current-speed curves of alternators: 1 — the Motorola 8SB2001-R; 2 — the Delco Remy 30 Si 400; 3 — the Bosch T4; 4 — the Marshall Fred A-14/30.

в схемах электрооборудования промышленных тракторов. В табл. 2 представлены характеристики индукторных генераторов отечественного производства в сравнении с зарубежным аналогом. В табл. 3 представлен сравнительный анализ индукторного генератора 11.3701 с аналогом зарубежного производства Delco Remy 30-52 min400 и перспективным образцом.

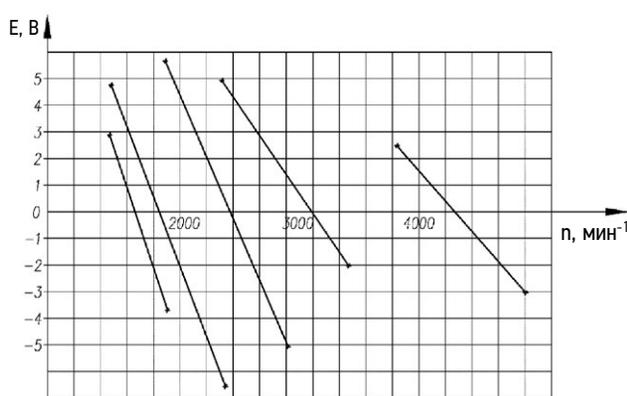
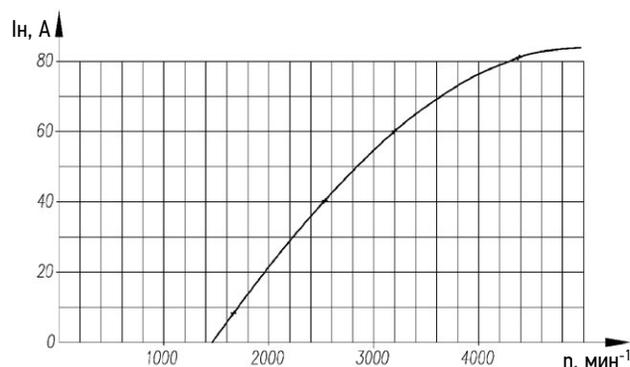
Генератор 11.3701 по техническому уровню соответствует лучшим мировым образцам. Предлагается повысить расчётную частоту вращения с 2000 до 4000 мин⁻¹ и максимальную мощность генератора

с 2772 до 5000 Вт, при увеличении веса всего на 1 кг, что позволит получить более высокий максимальный коэффициент использования генератора. В табл. 4 представлены результаты расчёта токоскоростной характеристики индукторного генератора 11.3701. Расчёт проводился по известной методике с использованием диаграммы Блонделя [3]. Расчёт выполнен методом последовательных приближений с помощью итераций (рис. 7).

Расчётная токоскоростная характеристика индукторного генератора 11.3701 представлена на рис. 8.

Таблица 3. Сравнительный анализ перспективного отечественного образца с зарубежным аналогом**Table 3.** Comparative analysis of a prospective domestic prototype with a foreign alternative

Параметры генератора	Результаты эксперимента	По ТУ	Перспективный образец	Delco Remy 30-52 min400
Номинальное напряжение, В	28	28	28	25/12,5
Максимальная мощность, Вт	2772	–	5000	975
Максимальный ток, А	99	–	178	78
Расчётный ток нагрузки, А	72	72	120	67
Частота вращения, при расчётном токе нагрузки, мин ⁻¹	2250	2500	4000	2200
Частота вращения начала отдачи, мин ⁻¹	1500	1500	2500	900
Ресурс генератора, моточасы (85%)	8000	8000	8000	–
Масса генератора, кг	24	25	25	13,5
Диаметр расточки статора, см	14,2	–	14,2	11,6
Длина пакета железа статора, см	4	–	4	2,5
Расчётная мощность, Вт	2016	–	3360	840
Удельная максимальная мощность, Вт/кг	115,5	–	200	72
Коэффициент использования генератора, Вт/(кг-об/мин)·10 ³	37,3	–	33,6	28,2
Коэффициент использования активных материалов, Вт/(кг-об/мин)·10 ³	51,5	–	48,2	–
Коэффициент использования обмоточной меди, Вт/(кг-мин ⁻¹)	273,1	–	256,1	–
Коэффициент использования расчётного объёма статора, Вт/(кг-мин ⁻¹)·10 ³	1,1	–	1,04	1,1
Показатели надёжности				
Наработка на отказ, мото час	5000	5000	5000	–
Гарантийный срок, год	2	2	2	–
Гарантийная наработка, мото час	4000	4000	4000	–

**Рис. 7.** Зависимость $\Delta E=f(n)$.**Fig. 7.** The $\Delta E=f(n)$ curves.**Рис. 8.** Токоскоростная характеристика индукторного генератора 11.3701.**Fig. 8.** The current-speed curve of the 11.3701 alternator.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён обзор и сравнительный анализ авто-тракторных индукторных генераторов отечественного и зарубежного производства, с различными магнитными системами и конструктивным исполнением. Определены преимущества и недостатки магнитной

цепи индукторных генераторов как отечественного, так и зарубежного производства, которые отображены в сравнительных таблицах и токоскоростных характеристиках. Для проведения расчёта была выбрана оптимальная конструкция индукторного генератора с наиболее эффективными технико-экономическими показателями.

Таблица 4. Результаты расчёта магнитной цепи генератора 11.3701

Table 4. Results of calculation of the magnetic circuit of the 11.3701 alternator

I_{ϕ}	5	5	10	10	20	20	30	30	40	40
$I_H = I_{\phi}/0,48-1,53$	8,9	8,9	19,3	19,3	40,1	40,1	61	61	81,8	81,8
n	1500	2000	1500	2500	2000	3000	2500	3500	4000	5000
U_{ϕ}	22,5	22,5	22,8	22,8	23,2	23,2	23,4	23,4	23,5	23,5
$f=0,1n$	150	200	150	200	200	300	250	350	400	500
$I_{\phi}f$	750	1000	1500	2000	4000	6000	7500	10500	16000	20000
$E_{aq}=5,52 \cdot 10^{-3} I_{\phi}f$	4,14	5,52	8,28	11,04	22,08	33,12	41,4	57,96	88,32	110,4
$E_{ad}=0,966 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\phi}f$	0,724	0,866	1,45	1,932	3,864	5,796	7,245	10,143	15,456	19,32
$E_g=1,5 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\phi}f$	1,125	1,5	2,25	3	6	9	11,25	15,75	24	30
$E_s + E_{aq}$	5,265	7,02	10,53	14,04	28,08	42,12	52,65	73,71	112,32	140,4
$E_a=0,033I_{\phi}$	0,165	0,165	0,33	0,33	0,66	0,66	0,99	0,99	1,32	1,32
$U_{\phi} + E_a$	22,66	22,66	23,13	23,13	23,86	23,86	24,39	24,39	24,82	24,82
$tg\psi$	0,23	0,309	0,455	0,607	1,1768	1,765	2,158	3,0221	4,5253	5,6567
ψ	13°	17°10	24°30	31°20	49°40	60°30	65°10	71°40	77°30	80°
$\sin\psi$	0,22	0,295	0,414	0,52	0,7623	0,870	0,907	0,9492	0,9763	0,9848
$\cos\psi$	0,97	0,955	0,91	0,8542	0,6472	0,492	0,42	0,3145	0,2164	0,1734
$E_g \sin\psi$	0,25	0,442	0,933	1,56	4,5736	7,833	10,20	14,95	23,431	29,544
$U_{\phi} \cos\psi$	21,9	21,5	20,74	19,475	15,015	11,42	9,828	7,3593	5,0854	4,0796
$E_{ad} \sin\psi$	0,16	0,285	0,601	1,0046	2,9455	5,201	6,574	9,6277	15,089	19,026
$E_{aq} \cos\psi$	4,03	5,27	7,534	9,4303	14,29	16,30	17,38	18,228	19,112	19,165
$\sum U_{\phi}$	26,3	27,5	29,81	31,47	39,82	40,76	44	50,165	62,7186	71,815
F_b	1974	1974	1974	1974	1974	1974	1974	1974	1974	1974
$F_d=17,026I_{\phi} \cdot \sin\psi$	19,15	25,13	70,61	88,53	259,6	296,3	463,5	484,8	664,9	670,8
$F_b - F_d$	1954	1948	1903	1885	1717	1677	1510	1489	1309	1303
$I_g = F_b - F_d \cdot 1290$	1,52	1,51	1,47	1,46	1,33	1,3	1,17	1,15	1,01	1,01
$E_{\phi 1}$	31,8	31,8	31,3	31,2	30,8	30,6	30,2	30	29,9	29,9
$E_{\phi n}$	23,25	31,8	23,47	39	30,8	45,9	97,75	52,2	60	74,75
ΔE	+3,12	-4,3	+5,4	-7,5	+6	-5,2	+6,25	-2	+2,7	-2,95

Проведён расчёт магнитной цепи и характеристики холостого хода трёхфазного одноименнополюсного, однопакетного индукторного генератора 11.3701 с классической зубцовой зоной и двухполупериодным выпрямителем. Расчёт токоскоростной характеристики выполнен по известной методике с использованием диаграммы Blondеля методом последовательных приближений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Е.А. Рябых — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений; Р.А. Малеев — экспертная оценка, утверждение финальной версии; А.В. Акимов — поиск публикаций по теме статьи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли

существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. E.A. Ryabikh — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, creating images; R.A. Maleev — expert opinion, approval of the final version. A.V. Akimov — search for publications on the topic of the article. All authors

made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябых Е.А., Малеев Р.А., Акимов А.В. Вентильные индукторные генераторы для транспортных средств специального назначения // Известия МГТУ «МAMI». 2023. Т. 17, №3. С. 287–294. EDN: GXUPIB doi: 10.17816/2074-0530-340855
2. Акимов С.В., Чижков Ю.П. Электрооборудование автомобилей. М.: За рулём, 2001.
3. Акимов С.В., Копылова Л.В. Расчёт выходных характеристик автотракторных индукторных генераторов. М.: МAMI, 1987.
4. Чернов А.Е., акимов А.В. Сравнительный анализ энергетических возможностей систем возбуждения тракторных

- генераторов // Тракторы и сельхозмашины. 2017. Т. 84, № 1. С. 46–53. doi: 10.17816/0321-4443-66274
5. Чернов А.Е., Акимов А.В. Автоматизированный контрольно-измерительный стенд для исследования автомобильных и автобусных генераторных установок // Известия МГТУ «МAMI». 2014. Т. 1, №2. С. 5–12. EDN: SXGXIL
6. Фесенко М.Н., Копылова Л.В., Коротков В.И., Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования. М.: Машиностроение, 1992.

REFERENCES

1. Ryabikh EA, Maleev RA, Akimov AV. Switched inductor generators for special purpose vehicles. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2023;17(3):287–294. EDN: GXUPIB doi: 10.17816/2074-0530-340855
2. Akimov SV, Chizhkov YuP. *Electrical equipment of cars*. Moscow: Za rulem; 2001.
3. Akimov SV, Kopylova LV. *Calculation of output characteristics of automotive and tractor inductor generators*. Moscow: MAMI; 1987.

4. Chernov AE, Akimov AV. Comparative analysis of the energy capabilities of excitation systems for tractor generators. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;84(1):46–53. doi: 10.17816/0321-4443-66274
5. Chernov AE, Akimov AV. Automated test bench for the study of automobile and bus generator sets. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014. Т. 1, №2. С. 5–12. EDN: SXGXIL
6. Fesenko MN, Kopylova LV, Korotkov VI. *Theory, design and calculation of automotive electrical equipment*. Moscow: Mashinostroenie; 1992.

ОБ АВТОРАХ

* **Рябых Евгений Александрович**, аспирант кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»; адрес: Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38; ORCID: 0000-0001-7112-1019; eLibrary SPIN: 4843-6000; e-mail: fczl98@bk.ru

Малеев Руслан Алексеевич, доцент, канд. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»; ORCID: 0000-0003-3430-6406; eLibrary SPIN: 7801-3294; e-mail: 19rusmal@gmail.com

Акимов Андрей Валентинович, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и промышленная электроника»; ORCID: 0009-0002-6010-8817; eLibrary SPIN: 8238-8598; e-mail: a.akimov5@mail.ru

AUTHOR'S INFO

* **Evgeniy A. Ryabikh**, Postgraduate of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; address: 38 Bolshaya Semenovskaya street, 107023 Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7112-1019; eLibrary SPIN: 4843-6000; e-mail: fczl98@bk.ru

Ruslan A. Maleev, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering), Professor of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; ORCID: 0000-0003-3430-6406; eLibrary SPIN: 7801-3294; e-mail: 19rusmal@gmail.com

Andrey V. Akimov, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Electrical Equipment and Industrial Electronics Department; ORCID: 0009-0002-6010-8817; eLibrary SPIN: 8238-8598; e-mail: a.akimov5@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author