

УДК621.314

**АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ ДЛЯ  
СОЗДАНИЯ ПУСКОВОГО МОМЕНТА ТРЕХКАСКАДНОГО  
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА****М.А. Жарков, А.В. Сапсалева, С.А. Харитонов,  
Г.С. Зиновьев, В.В. Жуловян***Новосибирский государственный технический университет*

В последние годы при проектировании электротехнического оборудования летательных аппаратов в части систем электроснабжения отдается предпочтение совмещению функций стартера (в частности газотурбинных двигателей) и системы генерирования электрической энергии в одном агрегате, который получил название «стартер-генератор». Такое техническое решение позволяет улучшить массогабаритные показатели и повысить надежность систем электроснабжения летательных аппаратов. Эта тенденция особенно отчетливо стала проявляться в связи с реализацией концепции «полностью электрического самолета», что потребовало значительного увеличения мощности и функциональных возможностей генераторов и устройств преобразования параметров электрической энергии как основных, так и дополнительных каналов генерирования. В статье рассмотрена возможность реализации двигательных режимов работы трехкаскадного бесконтактного генератора с демпферной обмоткой, что позволяет использовать его в качестве стартера в процессе запуска газотурбинного двигателя. Найдены соотношения, позволяющие определить длительность первого этапа запуска газотурбинного двигателя.

*Ключевые слова:* газотурбинный двигатель, трехкаскадный синхронный генератор, электростартерный запуск, асинхронный режим пуска.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-64-76

**Введение**

Для функционирования газотурбинного двигателя (ГТД) необходимо создать условия для подачи топлива в камеру сгорания, такие как расход воздуха и давление. Для создания этих условий ротор ГТД необходимо раскрутить до оборотов, необходимых для выхода на режим малого газа.

Наибольшее распространение для запуска ГТД летательных аппаратов получили турбостартерный и электрический способы запуска [1]. При турбостартерном запуске в качестве стартера используется турбокомпрессорный стартер, представляющий собой малогабаритный газотурбинный двигатель с ограниченной продолжительностью работы в стартерном режиме. Использование турбостартеров усложняет производство и эксплуатацию газотурбинного двигателя, увеличивает общее время запуска.

Этим объясняется преимущественное применение для запуска газотурбинных двигателей на летательных аппаратах электрических способов, при которых запуск осуществляется либо непосредственно стартером, либо стартер-генератором. В качестве источника электрической энергии используются бортовые аккумуляторные батареи или аэродромный источник электрической энергии. Электростартер является отдельной конструктивной единицей относительно большой массы и габаритов и выполняет только функции запуска. В дальнейшем во время полета он не используется, увеличивая полетную массу самолета.

Поэтому при проектировании электротехнического оборудования современных летательных аппаратов, как правило, отдается предпочтение совмещению функций стартера газотурбинных двигателей и системы генерирования электрической энергии в одном агрегате, который получил название «стартер-генератор» (СТГ) [2, 3]. Такое совмещение позволяет уменьшить полетную массу летательного аппарата и повысить надежность системы электроснабжения и удачно вписывается в концепцию полностью электрического самолета [3, 4].

В то же время отечественной промышленностью выпускаются бесконтактные генераторы с вращающимся выпрямителем серии ГТ, которые в настоящее время широко используются на самолетах и вертолетах [5]. Как отмечается в [5], генераторы этого типа обладают высокими удельными массогабаритными показателями и возможностями достижения требуемого качества электрической энергии. Несмотря на то что машины данного типа выпускаются как генераторы, существует возможность их использования в двигательном режиме для осуществления запуска газотурбинного двигателя. В статье рассматривается один из возможных способов запуска ГТД с помощью бесконтактного генератора с вращающимся выпрямителем.

### 1. Генераторный режим СТГ

Бесконтактные генераторы с вращающимся выпрямителем серии ГТ представляют собой трехкаскадный электрохимический преобразователь, содержащий основную электрическую машину с демпферной клеткой, возбудитель и подвозбудитель. Схема соединения обмоток электрических машин бесконтактного генератора и цепей их питания приведена на рис. 1.

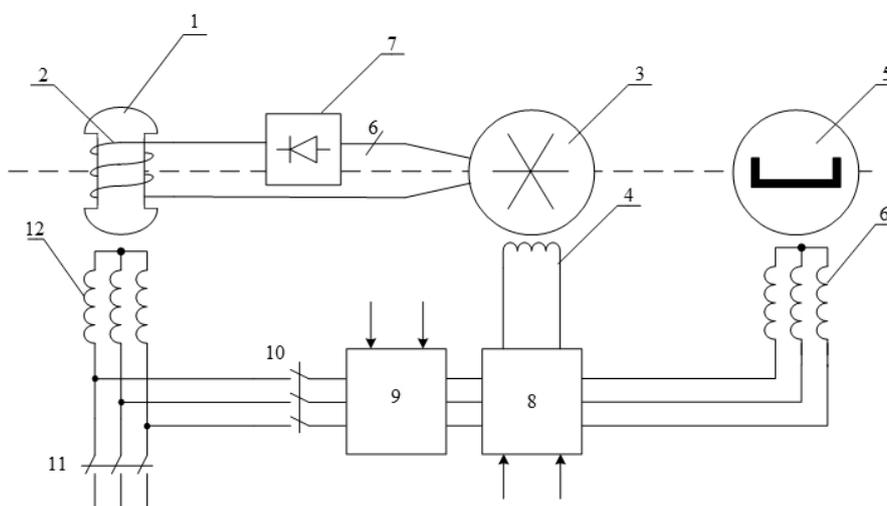


Рис. 1 – Структурная схема соединения обмоток электрических машин бесконтактного генератора и цепей их питания

Fig. 1 – A block diagram of connection of windings of electric machines of a contactless generator and their supply circuits

Основная электрическая машина и возбудитель представляют собой синхронный генератор с электромагнитным возбуждением, а подвозбудитель – магнитоэлектрический генератор. Индуктор 1 основной электрической машины с обмоткой возбуждения 2, якорная обмотка возбудителя 3, вращающийся выпрямитель 7

и постоянные магниты индуктора подвозбудителя 5 располагаются на общем валу, связанным с валом ГТД. В генераторном режиме работы, который является основным для рассматриваемого электромеханического преобразователя, обмотка возбуждения основной электрической машины получает питание постоянным током от вращающегося выпрямителя, входы которого связаны с выходами якорной обмотки возбудителя. При вращении роторного вала в якорной обмотке 6 подвозбудителя индуцируется трехфазная система ЭДС, которая через промежуточный выпрямитель обеспечивает питание постоянным током обмотки возбуждения 4 возбудителя. В обмотке якоря 3 возбудителя также индуцируется трехфазная система ЭДС. Напряжение обмотки якоря после выпрямления во вращающемся выпрямителе 7 обеспечивает питание обмотки возбуждения основной электрической машины.

На рис. 1 обозначены также блок регулирования 8 и блок управления режимами работы основной электрической машины 9. Линейные контакторы 10 и 11 осуществляют переключение якорной обмотки основной электрической машины 12 в генераторном и стартерном режиме работы.

## 2. Стартерный режим СТГ

Возможность использования основной электрической машины в качестве стартера, т. е. в двигательном режиме, вытекает из условия обратимости электрических машин. При рассмотрении данного режима будем исходить из того, что СТГ должен обеспечить запуск газотурбинного двигателя за время 45...50 с, а максимальная мощность запуска не превышает 20 % номинальной мощности СТГ в режиме генерирования [6, 7].

Из условия обратимости следует, что для использования основной электрической машины (синхронного генератора) при запуске ГТД в качестве стартера необходимо обеспечить ее работу в режиме синхронного двигателя. Известно, что пуск синхронного двигателя непосредственным включением в сеть имеет весьма ограниченные возможности. Для пуска синхронных двигателей применяют специальные способы, сущность которых состоит в предварительной раскрутке ротора до скорости, близкой к синхронной, при которой обеспечивается магнитная связь между статором и ротором.

Для первоначальной раскрутки общего ротора всех машин электромеханического преобразователя без изменения его конструкции могут быть реализованы частотный и асинхронный способы пуска синхронных двигателей. Рассмотрим асинхронный пуск основной электрической машины. Реализовать данный режим позволяет наличие в полюсных наконечниках системы возбуждения основной электрической машины демпфирующих стержней, которые образуют на роторе короткозамкнутую клетку. Если обеспечить питание якорной обмотки 12 основной электрической машины трехфазной системой токов, не подавая питание на обмотку возбуждения, то взаимодействие токов, индуцируемых в короткозамкнутых стержнях демпферной обмотки, с магнитным полем якорной обмотки создаст асинхронный электромагнитный момент.

Таким образом, весь процесс фазы запуска ГТД, реализуемый посредством бесконтактного синхронного генератора системы электроснабжения летательного аппарата, можно разбить на два этапа. На первом этапе запуска реализуется асинхронный режим работы основной электрической машины. Электромагнитный момент, создаваемый стартером при работе в асинхронном режиме, обеспечивается демпферной клеткой. Роторная обмотка возбуждения на данном этапе не запитывается. Основной момент сопротивления, который необходимо преодолеть стартер-генератору в процессе запуска газотурбинного двигателя, создает

компрессор. Этот момент пропорционален квадрату частоты вращения  $\omega$  компрессора:

$$M_c = A_k \omega^2, \quad (1)$$

где  $A$  – постоянная, характеризующая параметры компрессора.

Таким образом, в начальном процессе пуска стартер-генератор должен развить момент, необходимый для преодоления только инерции вращающихся частей [8]. Поэтому асинхронный момент, создаваемый демпферной клеткой основной электрической машины при подключении ее статорной обмотки к трехфазной системе токов, оказывается достаточным для осуществления начальной раскрутки вала газотурбинного двигателя.

Первый этап фазы запуска позволяет достичь необходимой скорости вращения, при которой становится возможным использование напряжений магнитоэлектрического генератора подвозбудителя, индуцируемых в его обмотке якоря, для вычисления угла положения ротора. Это позволяет перейти ко второму этапу фазы запуска газотурбинного двигателя, в процессе которого обеспечивается работа основной электрической машины в режиме синхронного двигателя с зависимой коммутацией фаз якорной обмотки. Для этого подается питание на ее обмотку возбуждения, а для синхронизации осей магнитных потоков ротора и статора используется полученная информация о положении вала машины, в соответствии с которой реализуется полеориентированная векторная система управления [9].

Команду на переход ко второму этапу фазы запуска формирует блок регулирования  $\delta$ , в котором контролируется напряжение, индуцируемое в обмотках якоря подвозбудителя. По этой команде обмотка якоря  $b$  подвозбудителя через выпрямитель, располагаемый в блоке регулирования, подключается к обмотке возбуждения  $5$  возбудителя, питаемая ее постоянным током. Обмотка якоря синхронного возбудителя  $3$  соединяется через блок вращающегося выпрямителя  $7$  с обмоткой возбуждения  $2$  основного генератора. В результате обмотка возбуждения основной электрической машины также получает питание постоянным током. По этой же команде (перехода ко второму этапу фазы запуска) блок регулирования  $\delta$  на основании напряжений обмотки якоря  $b$  подвозбудителя формирует сигналы, определяющие угловое положение ротора относительно полюсов обмотки статора  $12$  основной электрической машины. Эти сигналы поступают на вход блока  $9$ . На основании этих сигналов в блоке  $9$  формируется закон управления силовыми ключами инвертора, обеспечивающий оптимальную ориентацию полюсов обмотки статора  $12$  основной электрической машины относительно магнитного потока обмотки возбуждения  $2$ . В результате во втором этапе фазы запуска основная электрическая машина переводится в режим синхронного двигателя с коммутацией фаз обмотки статора  $3$ , зависящей от их положения относительно магнитного поля индуктора  $1$ . (Синхронные двигатели, работающие с зависимой коммутацией фаз, часто называют вентильными двигателями, в англоязычной литературе – BLDC или PMSM.)

Второй этап запуска заканчивается, когда частота вращения роторного модуля оказывается достаточной для запуска и зажигания газотурбинного двигателя. Рекомендуемое значение скорости вращения вала для стабильной и надежной работы газотурбинного двигателя составляет 55 % от номинальной скорости газотурбинного двигателя, при этой скорости работа основной электрической машины в режиме стартера может быть завершена [12].

После запуска и зажигания газотурбинного двигателя линейный контактор  $10$  размыкается, а линейный контактор  $11$  замыкает свои контакты. Главная электрическая машина переходит в режим бесконтактного синхронного генератора.

Трехфазное электрическое напряжение генератора через линейный переключатель *11* подается в бортовую сеть самолета. Для стабилизации напряжения может быть использован полупроводниковый преобразователь тока в обмотке возбуждения генератора, входящий в состав блока регулирования  $\delta$ .

### 3. Оценка времени пуска на первом этапе фазы разгона

Как известно, демпфирующие стержни синхронного генератора выполняют функции успокоительной обмотки и должны обеспечивать механическую прочность ротора, повышать коэффициент синусоидальной формы с одновременным обеспечением равномерности магнитного поля в рабочем пространстве, уменьшать последствия плохо распределенных трехфазных нагрузок и демпфировать вибрации во время переходных нагрузок. Но они не рассчитаны для выполнения функций беличьей клетки при работе машины в режиме асинхронного двигателя.

Прямой пуск синхронных машин в асинхронном режиме привлекает своей простотой и экономичностью [10], но требует разработки специальной конструкции пусковой клетки, так как в процессе пуска в роторе выделяется значительная энергия, которая может приводить к его перегреву. Вариант, связанный с усложнением конструкции ротора трехкаскадного синхронного генератора летательных аппаратов, для практической реализации вряд ли приемлем. Поэтому следует рассмотреть вопросы, связанные с ограничением напряжения питания и временем работы на первом этапе фазы запуска ГТД. Понятно, что асинхронный пуск при пониженном напряжении уменьшает воздействие пусковых токов на синхронную машину, но количество энергии, выделяющейся в роторе мощных электрических машин, уменьшается незначительно – на 10...11 % [11]. Следовательно, в качестве основного фактора следует оценить время работы на первом этапе фазы запуска ГТД. Это тем более важно при наложенных ограничениях на время запуска газотурбинного двигателя (45...50 с), и максимальную мощность запуска (менее 20 % номинальной мощности СТГ в режиме генерирования).

При анализе электромеханических процессов примем следующие допущения.

1. Скорость протекания электромагнитных процессов в переходных режимах по отношению к скорости протекания электромеханических процессов пренебрежимо мала.

2. Связь между валами электрических машин трехкаскадного агрегата абсолютно жесткая.

3. Силами трения в шарикоподшипниковых узлах роторной системы бесконтактного генератора пренебрегаем.

В результате данных допущений расчетную модель электромеханических процессов можно описать классическим уравнением движения привода

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где  $M$  – асинхронный электромагнитный момент электрической машины;  $M_c$  – статический момент сопротивления движению;  $J$  – момент инерции электромеханизмов трехкаскадного генератора, приведенный к оси вращения вала роторной системы;  $\omega$  – угловая скорость вала роторной системы.

В соответствии с принятыми допущениями момент статического сопротивления движению определяется уравнением (1), с учетом которого уравнение (2) приводится к виду

$$M - A_k \omega^2 = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Представим данное уравнение относительно производной по времени:

$$dt = J \frac{d\omega}{M - A_k \omega^2}.$$

Для оценки прогнозируемого времени пуска положим, что в процессе первого этапа запуска блок управления режимами работы основной электрической машины обеспечивает постоянство ее электромагнитного момента во всем диапазоне изменения частоты вращения. С учетом данного условия после интегрирования прогнозируемое время пуска до заданного значения скорости  $\omega_1$  определится выражением

$$t_{p1} = \frac{J}{2\sqrt{MA_k}} \ln \left| \frac{\sqrt{M/A_k} + \omega_1}{\sqrt{M/A_k} - \omega_1} \right|.$$

Обозначим  $T = J / \sqrt{MA_k}$  – инерционная постоянная времени [9], тогда относительное значение прогнозируемого времени пуска до заданной скорости будет равно:

$$\tau = \frac{t_{p1}}{T} = \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\sqrt{M/A_k} + \omega_1}{\sqrt{M/A_k} - \omega_1} \right|. \quad (3)$$

На рис. 2 представлено семейство характеристик  $\tau = f(\omega_1)$  при  $M/A_k = \text{const}$ .

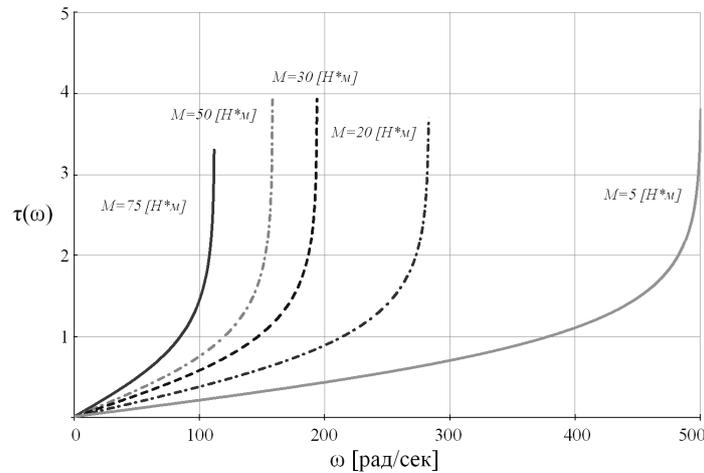


Рис. 2 – Семейство характеристик  $\tau = f(\omega_1)$

Fig. 2 – A set of curves of  $\tau = f(\omega_1)$

Анализ характеристик показывает, что рациональное значение времени пуска не должно превышать двух относительных величин. Эта величина определяет время выхода на установившийся режим в процессе первого этапа фазы запуска ГТД. Следовательно, дальнейшее увеличение времени первого этапа фазы запуска фактически не приводит к увеличению скорости вращения вала роторной системы. Таким образом, можно рекомендовать ограничение времени первого этапа фазы пуска на уровне 1,5 относительных единиц.

#### 4. Результаты моделирования

Моделирование проводилось в программном пакете PSIM, реализованная модель была максимально приближена к реальному устройству, в том числе была создана модель электромеханической части трехкаскадного генератора. На рис. 3 представлена модель силовой части starter-генераторной системы, в которой трехкаскадный генератор представлен системой из трех электрических машин, объединенных общим валом. Реализация момента сопротивления на валу была выполнена с помощью блока моментной нагрузки, входным параметром которого была функция зависимости момента от угловой частоты вращения вала.

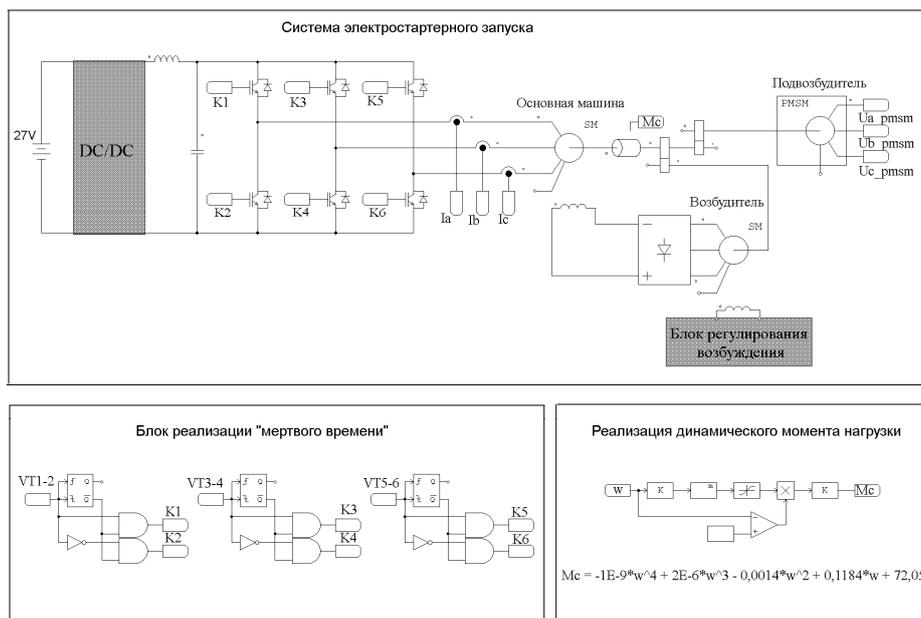


Рис. 3 – Математическая модель силовой части starter-генераторной системы

Fig. 3. A mathematical model of the power part of the starter-generator system

Также была реализована дискретная система управления на основе DLL-блока, с помощью которого реализуется имитация выполнения алгоритмов, написанных на языке программирования С (рис. 4).

Все результаты моделирования представлены в относительных величинах, за базовые параметры были взяты номинальные параметры скорости, действующего значения тока и напряжения для генераторного режима работы синхронной машины, электромагнитный момент и момент сопротивления приводились к максимальному моменту сопротивления на валу машины. Представленные на рис. 5 осциллограммы соответствуют диапазону времени от нуля до момента перехода в синхронный режим. Осциллограммы соответствуют асинхронному пуску трехкаскадного синхронного генератора, электромагнитный момент и обороты вала имеют колебательный характер с затуханием.

Результаты работы starter-генераторной системы в пусковом режиме представлены на рис. 6–8, осциллограммы скорости вала ( $n^*$ ) и задания на скорость ( $n_{ref}^*$ ), осциллограмма тока фазы А статорной обмотки синхронной машины ( $I_a^*$ ), осциллограммы момента сопротивления на валу ( $T_{сопр}^*$ ) и электромагнитного момента синхронной машины ( $T_{эм}^*$ ) соответственно. Моделирование

проводилось при изменении момента нагрузки на валу, в соответствии с работой реального газотурбинного двигателя самолета. Номинальное значение задания на скорость вращения вала соответствует 55 % от номинальной скорости вращения вала в режиме генерирования, данная скорость необходима и достаточна для уверенного выхода ГТД на режим малого газа.

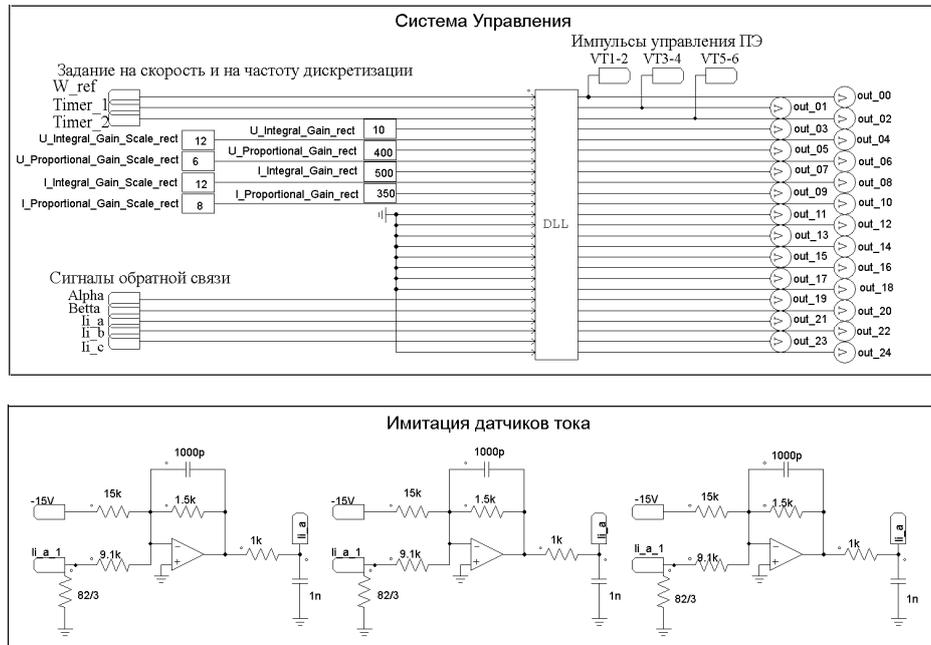


Рис. 4 – Математическая модель микропроцессорной системы управления  
 Fig. 4. A mathematical model of a microprocessor control system

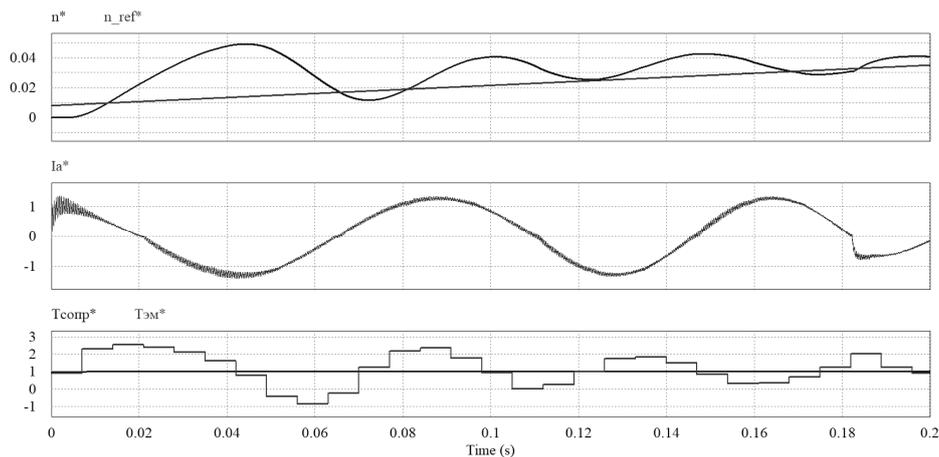


Рис. 5 – Осциллограммы скорости вала, тока и момента машины на участке асинхронного запуска  
 Fig. 5 – Oscillograms of the shaft speed, current and torque of the machine in the asynchronous start length

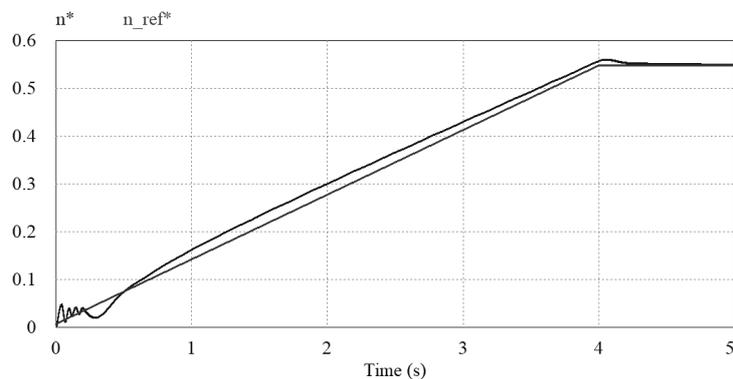


Рис. 6 – Осциллограммы скорости вала синхронного генератора

Fig. 6 – Oscillograms of the shaft speed of a synchronous generator

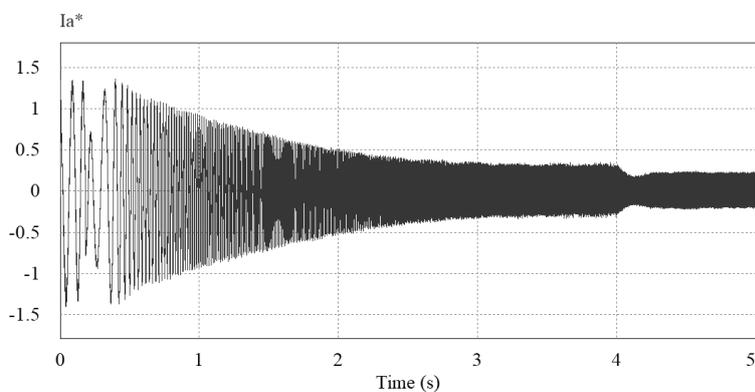


Рис. 7 – Осциллограмма тока фазы А синхронного генератора

Fig. 7 – Oscillograms of the A phase current of a synchronous generator

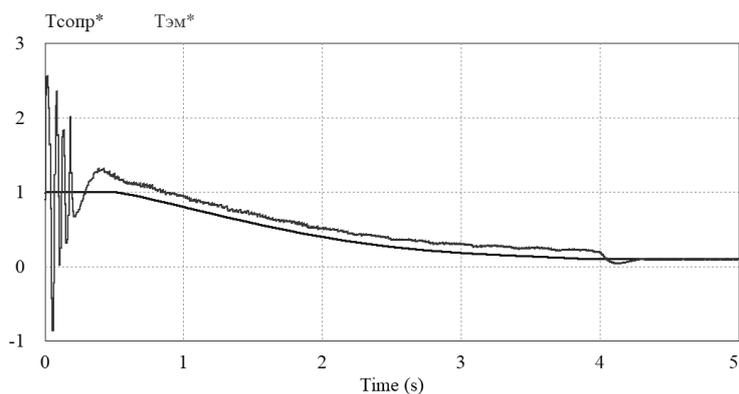


Рис. 8 – Осциллограммы момента сопротивления и электромагнитного момента синхронного генератора

Fig. 8 – Oscillograms of the moment of resistance and the electromagnetic moment of a synchronous generator

Результаты моделирования показывают, что электромагнитный момент, создаваемый в асинхронном режиме пуска, достаточен для преодоления начального момента сопротивления и вывода основной электрической машины на скорость вращения вала, необходимую для перехода в синхронный режим работы.

### Заключение

1. Показана возможность реализации двигательных режимов работы трехкаскадного бесконтактного генератора с демпферной обмоткой.
2. Возможность реализации двигательных режимов работы трехкаскадного бесконтактного генератора с демпферной обмоткой позволяет использовать его в качестве стартера в процессе запуска газотурбинного двигателя.
3. Найдены соотношения, позволяющие определить длительность первого этапа фазы запуска ГТД.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационное оборудование / Ю.А. Андриевский, Ю.Е. Воскресенский, Ю.П. Доброленский и др.; под ред. Ю.П. Доброленского. – М.: Воениздат, 1989. – 248 с.
2. **Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Simin V.S.** Electric starter mode of synchronous generator with permanent // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai, 2013. – P. 392–394.
3. Experiment results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source / M.A. Zharkov, P.A. Bachurin, S.A. Kharitonov, D.V. Korobkov, R.Yu. Sarakhanova, V.S. Simin // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – Erlagol, Altai, 2016. – P. 623–627.
4. Электрический самолет: от идеи до реализации: монография / А.В. Левин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалев. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
5. Электрический самолет: концепция и технологии: монография / А.В. Левин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалев, А.А. Герасин, С.П. Халютин. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 388 с.
6. Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 1: учебник для вузов / под ред. С.А. Грузкова. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
7. **Кац Б.М., Жаров Э.С., Винокуров В.К.** Пусковые системы авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 220 с.
8. **Локай В.И., Максимова М.К., Стрункин В.А.** Газовые турбины двигателей летательных аппаратов: теория, конструкция и расчет. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
9. Авиационные электрические машины. Ч. 1. Машины постоянного и переменного тока. Трансформаторы / К.С. Бобов, В.А. Винокуров, В.С. Аскерко, М.В. Кравчук, Г.И. Панасюк. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1960. – 642 с.
10. **Ставровский Б.А., Панов В.И.** Автоматизированный электропривод летательных аппаратов. – Киев: [б. и.], 1974. – 392 с.
11. Система частотного пуска мощного турбогенератора высокотемпературной гелиевой энергоустановки / Е.Ю. Анишев, А.В. Каржев, Г.Б. Лазарев, А.Н. Новаковский, А.Т. Султанов // Вестник ВНИИЭ. – М., 2004.
12. **Глебов И.А., Шулаков Н.В., Крутяков Е.А.** Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин. – Л.: Наука, 1988.
13. **Барвинский А.П., Козлова Ф.Г.** Электрооборудование самолетов: учебник для средних специальных учебных заведений. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.

**ANALYSIS OF THE USE OF DAMPER WINDINGS TO CREATE  
A STARTING TORQUE OF THE THREE-STAGE  
SYNCHRONOUS GENERATOR**

**Zharkov M.A., Sapsalev A.V., Kharitonov S.A.,  
Zinoviev G.S., Zhulovyan V.V.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

In recent years while designing electrical systems of aircraft electrical equipment preference is given to combining the functions of a starter and a system for generating electrical energy in one unit, which was named the starter-generator. This solution allows improving mass and dimensions parameters and increasing reliability. This trend became especially apparent in connection with the implementation of the concept of a "fully electric aircraft," which led to a significant increase in the capacity and functionality of generators and devices for converting electrical energy into both primary and additional generation channels, which in turn made it possible to realize the motor (starter) mode using the generation channels. The article considers the possibility of realizing the motor operating modes of a three-stage brushless generator with a damper winding, which allows it to be used as a starter in the process of starting a gas turbine engine. The relations to determine the duration of the first stage of starting the gas turbine engine have been found.

*Keywords:* electric starting, three-stage synchronous generator, gas turbine engine, starter-generator, asynchronous start mode.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-4-64-76

REFERENCES

1. Dobrolenskii Yu.P., ed. *Aviatsionnoe oborudovanie* [Aircraft equipment]. Moscow, Voenizdat Publ., 1989. 248 p.
2. Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Simin V.S. Electric starter mode of synchronous generator with permanent. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, Altai, 2013, pp. 392–394.
3. Zharkov M.A., Bachurin P.A., Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Sarakhanova R.Yu., Simin V.S. Experiment results of laboratory tests of electrical starting system powered by a DC source. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, Erlagol, Altai, pp. 623–627.
4. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. *Elektricheskii samolet: ot idei do realizatsii* [An electric plane. From idea to realization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 288 p.
5. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev L.K., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Elektricheskii samolet: kontseptsiya i tekhnologii* [An electric plane. Concept and technology]. Ufa, UGATU Publ., 2014. 388 p.
6. Gruzkov S.A., ed. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov*. T. 1 [Electrical equipment of aircraft. Vol. 1]. Moscow, MEI Publ., 2005. 568 p.
7. Kats B.M., Zharov E.S., Vinokurov V.K. *Puskovye sistemy aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* [Launch systems of aviation gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 220 p.
8. Lokai V.I., Maksutova M.K., Strunkin V.A. *Gazovye turbiny dvigatelei le-tatel'nykh apparatov: teoriya, konstruksiya i raschet* [Gas turbines of aircraft engines. Theory, construction and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 512 p.
9. Bobov K.S., Vinokurov V.A., Askerko B.C., Kravchuk M.V., Panasyuk G.I. *Aviatsionnye elektricheskii mashiny*. Ch. 1. *Mashiny postoyannogo i peremennogo toka. Transformatory* [Aviation electrical machines. Pt. 1. Machines for direct and alternating current. Transformers]. Moscow, VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1960. 642 p.
10. Stavrovskii B.A., Panov V.I. *Avtomatizirovanniy elektroprivod letatel'nykh apparatov* [Automated electric drive of aircraft]. Kiev, 1974. 392 p.

11. Anishev E.Yu., Karzhev A.V., Lazarev G.B., Novakovskii A.N., Sultanov A.T. Sistema chastotnogo puska moshchnogo turbogeneratora vysokotemperaturnoi gelievoi energoustanovki [Frequency start-up system for a powerful turbo-generator of a high-temperature helium power plant]. *Vestnik VNIIE*. Moscow, 2004.
12. Glebov I.A., Shulakov N.V., Krutyakov E.A. *Problemy puska sverkhmoshchnykh sinkhronnykh mashin* [Problems of launching heavy-duty synchronous machines]. Leningrad, Nauka Publ., 1988. 196 p.
13. Barvinskii A.P., Kozlova F.G. *Elektrooborudovanie samoletov* [Electrical equipment of aircraft]. Moscow, Transport Publ., 1990. 320 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Жарков Максим Андреевич** – родился в 1988 году, ведущий инженер-конструктор, Институт силовой электроники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, электропривод. Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).

**Zharkov Maksim Andreevich** (b. 1988) – a leading design engineer, Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, and electric drive. He is the author of 25 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).



**Сапсалева Анатолий Васильевич** – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника, безредукторные электроприводы и их системы управления, электрические машины. Опубликовано более 120 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sapsalevav@ngs.ru).

**Sapsalev Anatoliy Vasil'yevich**, (b. 1950) – Doctor of Science (Eng.), professor at the Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on gearless electric drives and their control systems and power electronics. He is author of more than 120 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sapsalevav@ngs.ru).



**Харитонов Сергей Александрович** – родился в 1950 году, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, директор Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты, системы накопления электрической энергии. Опубликовано более 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Kharit1@yandex.ru).

**Kharitonov Sergey Aleksandrovich** (b. 1950) – Doctor of Science (Eng.), professor, head of the Department of Electronics and Electrical Engineering, Director of Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, and direct frequency converters. He is the author of 300 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: kharit1@yandex.ru).



**Зиновьев Геннадий Степанович** – д-р техн. наук, проф. кафедры электроники и электротехники (ЭЭ), Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), научный руководитель НИЛ ЭОПС. Область научных интересов: энергоэффективные регуляторы переменного напряжения, плавный пуск двигателей, силовая электроника. Автор учебника по основам силовой электроники, пяти изданий, трех монографий, более 110 патентов и авторских свидетельств, более 250 публикаций статей и докладов. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: genstep@mail.ru).

**Zinoviev Gennady Stepanovich** – Doctor of Sciences (Eng.), a professor at the Electronics and Electrical Engineering Department in the Novosibirsk State Technical University, a research supervisor of the Research Laboratory “Optimization of Energy in Converting Systems”. His research interests are currently focused on energy-efficient AC voltage regulators, soft-start of engines, and power electronics. He is the author of the textbook on power electronics, three monographies devoted to electromagnetic compatibility of converters, more than 110 patents and over 200 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: genstep@mail.ru).



**Жуловян Владимир Владимирович** – родился в 1936 году, д-р техн. наук, профессор, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка теории электро-механических преобразователей энергии с модулированным магнитным потоком, электропривод. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: zhulovyan@mail.ru).

**Zhulovyan Vladimir Vladimirovich** (b. 1936), Doctor of Sciences (Eng.), professor, Novosibirsk State Technical University. His research interests include development of the theory of electromechanical energy converters with a modulated magnetic flux, and electric drives. He has published 35 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: zhulovyan@mail.ru).

*Статья поступила 18 июля 2018 г.  
Received July 18, 2018*

---

To References:

Zharkov M.A., Sapsalev A.V., Kharitonov S.A., Zinoviev G.S., Zhulovyan V.V. Analiz ispol'zovaniya dempfernoi obmotki dlya sozdaniya puskovogo momenta trekhkaskadnogo sinkhronnogo generator [Analysis of the use of damper windings to create a starting torque of three-stage synchronous generator]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 4 (41), pp. 64–76. doi: 10.17212/1727-2769-2018-4-64-76.