

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 629.735.07(045)

Т. А. Мазур, асп.

**ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАШИН
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ
РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Аэрокосмический институт НАУ, e-mail: Mazur_T@bk.ru

Приведены рекомендации по выбору конструктивной схемы привода постоянной скорости вращения на базе электродинамического редуктора для бортовых систем генерирования переменного тока постоянной частоты летательных аппаратов с учетом специфики режимов работы их двигателей.

Введение. На большинстве современных самолетов в качестве первичных систем электроснабжения (СЭС) используются СЭС переменного тока постоянной частоты. Как показывает опыт зарубежных стран, генерирование переменного тока постоянной частоты можно выполнить с использованием электромеханических приводов постоянной скорости (ППС), в том числе и ППС на основе электродинамического редуктора (ЭДР) [2]. Наиболее глубокие исследования таких приводов были проведены в конце 60-х годов профессором М. М. Красношапкой [2; 3]. Однако с увеличением единичной мощности каналов генерирования современных самолетов, а также перспективами усовершенствования первичных систем генерирования [1] становится целесообразным вновь поднять вопрос об использовании в качестве ППС электромеханических систем и можно говорить об актуальности исследований в данном направлении.

Одним из актуальных вопросов для исследования с целью оптимального использования и технической эксплуатации ППС на основе ЭДР является выбор схемных решений и конструктивных параметров ЭДР с учетом различных режимов эксплуатации, включающих режимы полета, различающиеся по скорости, высоте, выполняемым маневрам, полетной массе летательного аппарата [4]. Исходя из этого, выбор конструктивной схемы ППС на базе ЭДР для бортовых систем генерирования переменного тока постоянной частоты летательных аппаратов должен учитывать специфику режимов работы двигателей конкретных самолетов. Для самолетов транспортной авиации и, в частности самолета Ан-70, имеет место продолжительная работа силовых установок в ряде конкретных скоростей вращения ротора ГТД внутри общего скоростного диапазона: скорости вращения свободной турбины ГТД в режиме наземного малого газа (ЗМГ) ($\omega_{\text{ЗМГ}}$), крейсерском ($\omega_{\text{кр}}$), максимальном ($\omega_{\text{макс}}$) режимах летной эксплуатации. Выбор конструктивных параметров ЭДР должен обеспечивать максимально возможные значения коэффициента полезного действия (КПД) ППС при указанных скоростях вращения ротора газотурбинного двигателя (ГТД) и не преследует цели равномерного деления скоростного диапазона на ступени и достижения максимума среднего значения КПД ППС. С целью выяснения наилучшего сочетания конструктивных параметров ЭДР проведем анализ энергетических характеристик ППС при различных соотношениях количества пар полюсов агрегата и наборе режимов работы на отдельных ступенях применительно к бортовой системе генерирования переменного тока постоянной частоты.

Постановка задачи. Задачу исследования можно сформулировать как рекомендации по выбору конструктивной схемы ППС на базе ЭДР с помощью анализа расчетных энергетических показателей работы ЭДР на отдельных ступенях.

Основная часть. Особенностью ППС на базе ЭДР является улучшение энергетических характеристик привода (ограничение максимальной величины мощности потерь скольжения) путем сочетания ступенчатого изменения скорости вращения магнитного поля в пространстве с

плавным регулированием скольжения ведомого ротора асинхронной муфты (АМ). Каждой ступени работы ЭДР однозначно соответствует определенное количество пар полюсов ведущего ротора АМ и направление вращения магнитного поля относительно ведущего ротора. Направление вращения поля ведущего ротора относительно самого ротора осуществляется с помощью вращающегося магнитного переключателя (ВЭП) [3].

Передаточное число редуктора определяется соотношением количества пар полюсов синхронной машины (СМ) и АМ и величиной текущего скольжения $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \left(1 \pm \frac{P_{СМ}}{P_{АМ}}\right)(1-s)$.

Энергетические показатели ППС на базе ЭДР тем лучше, чем больше количество ступеней, на которые разбивается весь диапазон изменения скорости вращения приводного двигателя. Увеличения количества ступеней скоростного диапазона можно добиться, если:

1. поочередно использовать режимы работы с повышающим и понижающим передаточным отношением ЭДР;
2. применить в ЭДР АМ с полюсопереключаемой обмоткой на ведущем роторе;
3. применить режим работы, когда возбуждение обмотки ведущего ротора осуществляется выпрямленным током [3].

В качестве исходной информации для расчетов примем технические характеристики ГТД Д-27 (самолет Ан-70), полагая, что полная мощность канала генерирования равна 90 кВ·А, а выходная частота вращения ППС – 8000 об/мин. Расчеты величин скольжения скоростей, энергетических показателей ЭДР проведены на основе известной методики расчета ЭДР с регулируемым передаточным отношением [3].

Расчетные данные двухступенчатого ЭДР с повышающей и понижающей передачами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные данные двухступенчатого ЭДР с повышающей и понижающей передачами

| $P_{СМ}$ | $P_{АМ}$ | $\frac{\omega_{1min}}{\omega_{1max}}$ | Скорость вращения входного вала при переключении $\omega_{1пер}$, рад/с | Величина скорости входного вала в крейсерском режиме полета $\omega_{кр}$, рад/с | Величина скольжения в установившихся режимах работы ГТД | | |
|----------|----------|---------------------------------------|--|---|---|---------------------|------------------------|
| | | | | | ЗМГ $s_{ЗМГ}$ | крейсера $s_{кр.р}$ | максимальном s_{max} |
| 1 | 5 | 720/1250 | 1100 | 1150 | 0,03 | 0,06 | 0,17 |
| | 6 | 740/1300 | 1000 | 1200 | 0,03 | 0,12 | 0,2 |
| 2 | 9 | 700/1250 | 1110 | 1140 | 0,03 | 0,03 | 0,14 |
| | 10 | 720/1250 | 1100 | 1150 | 0,03 | 0,06 | 0,17 |

Энергетические показатели двухступенчатого ЭДР с повышающей и понижающей передачами приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные энергетические показатели двухступенчатого ЭДР с повышающей и понижающей передачами

| $P_{СМ}$ | $P_{АМ}$ | s_{1max} | s_{2max} | ΔP_{1max} , кВт | ΔP_{2max} , кВт | $\Delta P_{кр.р}$, кВт | $\Delta P_{ЗМГ}$, кВт | η_{1min} | $\eta_{2min}(\eta_{max})$ | $\eta_{кр.р}$ | $\eta_{ЗМГ}$ |
|----------|----------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------|
| 1 | 5 | 0,35 | 0,17 | 46 | 17 | 5,6 | 2,6 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,84 |
| 1 | 6 | 0,3 | 0,2 | 37,5 | 24,5 | 12, | | 0,66 | 0,73 | 0,73 | |
| 2 | 9 | 0,38 | 0,14 | 52,5 | 13 | 2,6 | | 0,58 | 0,8 | 0,84 | |
| 2 | 10 | 0,35 | 0,17 | 46 | 17 | 5,6 | | 0,6 | 0,7 | 0,8 | |

Полученные результаты, принимая во внимание ограничение (минимизацию) потерь скольжения в установившихся режимах работы ГТД, позволяют выбрать ЭДР с соотношением количества пар полюсов СМ и АМ 2/9, энергетические показатели которого согласно табл. 2 составляют: мощности потерь скольжения, выделяемых в ведомом роторе ЭДР, составляют 2,6 кВт в режиме ЗМГ и крейсерском режиме, 13 кВт в максимальном, максимальная величина потерь скольжения, выделяемая в ведомом роторе ЭДР в переходном режиме работы ГТД, на повышающей ступени составляет 52,5 кВт. При таких величинах потерь скольжения в ведомом роторе ЭДР КПД ППС составляет 0,84 в режиме земного малого газа и крейсерском режиме и 0,8 в максимальном. А минимальное значение КПД в переходных режимах работы при максимальном уровне потерь на повышающей передаче составляет 0,58. Исходя из данных табл. 1 общий скоростной диапазон разбивается на ступени: 720...1100 рад/с составляет первую ступень регулирования, а диапазон скоростей 1100...1250 рад/с – вторую ступень. Скорость вращения входного вала ЭДР при работе авиадвигателя в крейсерском режиме равна 1150 рад/с.

Изменение рассчитанных энергетических показателей в зависимости от скорости вращения входного вала ЭДР для выбранных конструктивных параметров ЭДР представлено на рис. 1.

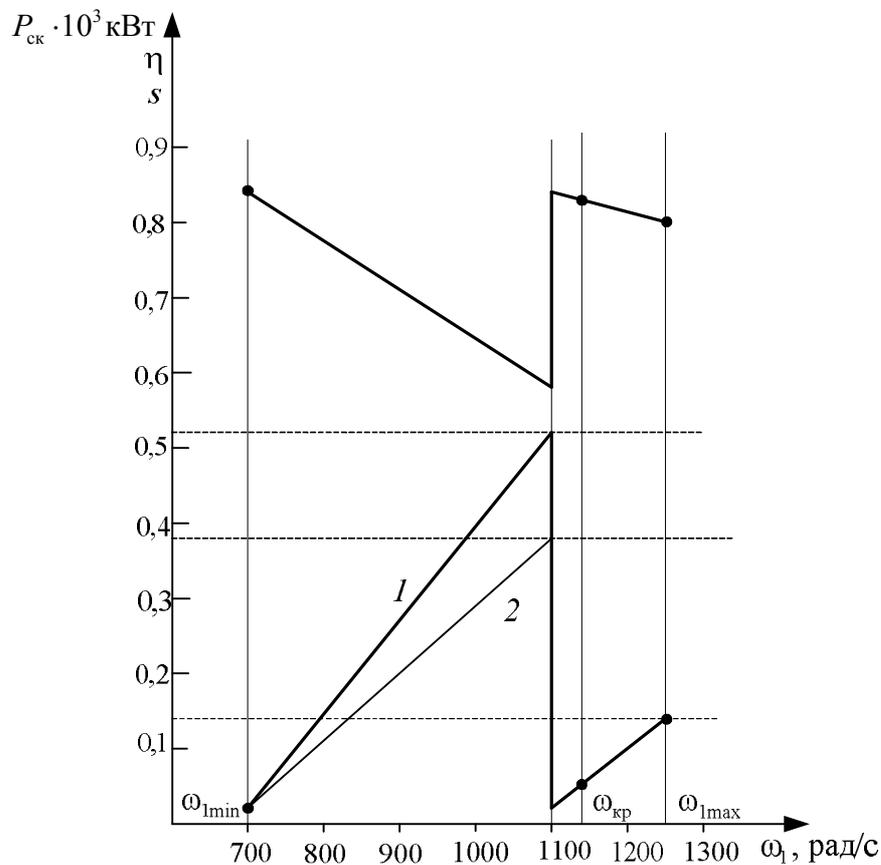


Рис. 1. График зависимости энергетических показателей двухступенчатого ЭДР с повышающей и понижающей передачами от скорости вращения входного вала для варианта исполнения $\frac{p_{СМ}}{p_{АМ}} = \frac{2}{9}$:

1 – график зависимости мощности потерь скольжения от скоростного диапазона; 2 – график зависимости скольжения от скоростного диапазона; 3 – график зависимости КПД ЭДР от скоростного диапазона

Точки на графиках соответствуют значениям величин скольжения, мощности потерь скольжения и КПД ЭДР данной конструкции в установившихся режимах работы. Показанные на рис. 1 увеличение мощности потерь скольжения 2,6...52,5 кВт в процессе разгона ротора свободной турбины ГТД и снижение КПД ППС 0,84...0,58 не оказывают существенного влияния

на тепловые режимы работы АМ и энергетическую эффективность ЭДР вследствие непродолжительности переходного процесса изменения скорости вала свободной турбины в процессе раскрутки ротора ГТД, определяемой приемистостью двигателя.

Данные расчета скоростей вращения входного вала ЭДР в установившихся режимах работы ГТД и величины скольжений в этих режимах для различных сочетаний количества пар полюсов машин ЭДР с полюсопереключаемой АМ приведены в табл. 3, а энергетические показатели работы на отдельных ступенях – в табл. 4.

Таблица 3

Расчетные данные двухступенчатого ЭДР с двумя повышающими передачами и асинхронной полюсопереключаемой муфтой

| $\frac{P_{AM}}{P_{AM1}}$ | P_{CM} | $\frac{\omega_{1min}}{\omega_{1max}}$ | Скорость вращения входного вала при переключении, $\omega_{1пер}$, рад/с | Скорость вращения входного вала ЭДР в крейсерском режиме $\omega_{кр}$, рад/с | Величина скольжения в установившихся режимах работы ГТД | | |
|--------------------------|----------|---------------------------------------|---|--|---|---------------------|------------------------|
| | | | | | ЗМГ $s_{ЗМГ}$ | крейсера $s_{кр.р}$ | максимальном s_{max} |
| 1/2 | 1 | 430/753 | 575 | 690 | 0,03 | 0,2 | 0,25 |
| 1/3 | 1 | 430/753 | 650 | 690 | 0,03 | 0,06 | 0,17 |
| 2/5 | 2 | 430/753 | 617 | 690 | 0,03 | 0,12 | 0,2 |
| 2/7 | 2 | 430/753 | 670 | 690 | 0,03 | 0,03 | 0,14 |

Таблица 4

Расчетные энергетические показатели двухступенчатого ЭДР с двумя повышающими передачами (полюсопереключаемой АМ)

| P_{CM} | $\frac{P_{AM}}{P_{AM1}}$ | s_{1max} | s_{2max} | ΔP_{1max} , кВт | ΔP_{2max} , кВт | $\Delta P_{кр.р}$, кВт | $\Delta P_{ЗМГ}$, кВт | η_{1min} | $\eta_{2min}(\eta_{max})$ | $\eta_{кр.р}$ | $\eta_{ЗМГ}$ |
|----------|--------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------|
| 1 | 1/2 | 0,27 | 0,26 | 32 | 30 | 17 | 2,6 | 0,63 | 0,67 | 0,75 | 0,84 |
| 1 | 1/3 | 0,35 | 0,17 | 46 | 17 | 5,6 | | 0,56 | 0,77 | 0,87 | |
| 2 | 2/5 | 0,3 | 0,2 | 40 | 22 | 10 | | 0,58 | 0,73 | 0,82 | |
| 2 | 2/7 | 0,37 | 0,14 | 51 | 13,5 | 2,4 | | 0,54 | 0,8 | 0,9 | |

Результаты сравнения расчетных параметров (табл. 3 и 4), исходя из обеспечения максимально возможных значений КПД ППС на основе ЭДР рассматриваемой конструкции при указанных выше скоростях вращения ротора ГТД, позволяют выбрать ЭДР с соотношением количества пар полюсов СМ $P_{CM} = 2$ и полюсопереключаемой АМ $\frac{P_{AM}}{P_{AM1}} = 2/7$. Для данного

расчетного примера согласно табл. 4 значения величин скольжения в установившихся режимах работы ГТД составляют 0,03 в режиме ЗМГ и в крейсерском режиме работы и 0,14 в максимальном. Мощности потерь скольжения, выделяемых в ведомом роторе при активной мощности канала генерирования 72 кВт, составляют 2,6 кВт (ЗМГ), 2,4 кВт в крейсерском режиме и 13,5 кВт в максимальном режиме. Максимальная величина потерь скольжения, выделяемых в ведомом роторе ЭДР в переходном режиме работы ГТД, составляет 51 кВт. При таких величинах потерь скольжения в ведомом роторе ЭДР КПД ППС составляет 0,84 в режиме ЗМГ, 0,9 в крейсерском режиме и соответственно 0,8 в максимальном режиме. А минимальные значения КПД при максимальном уровне потерь на первой повышающей передаче снизятся до 0,54. Общий скоростной диапазон согласно табл. 3 разбивается на две ступени

регулювання: зміна швидкості входного вала ЕДР від 430 до 575 рад/с становить першу ступінь регулювання, а зміна швидкості від 575 до 753 рад/с – другу ступінь. Швидкість обертання входного вала ЕДР при роботі авіадвигателя в крейсерському режимі дорівнює 690 рад/с.

На рис. 2 наведені розрахункові енергетичні залежності потужності втрат ковзання та КПД від швидкості обертання входного вала ЕДР, побудовані для ЕДР з відношенням кількості пар полюсів СМ $p_{CM} = 2$ і полюсопереключаємої АМ $\frac{P_{AM}}{P_{AM1}} = 2/7$.

Точки на графіках відповідають значенням величин ковзання, потужності втрат ковзання та КПД ЕДР даної конструкції в установившихся режимах роботи. Показані на рис. 2 збільшення потужності втрат ковзання в процесі розгону ротора вільної турбіни ГТД та зниження КПД ППС не оказують суттєвого впливу на теплові режими роботи АМ та енергетичну ефективність ЕДР внаслідок недовготривалості перехідного процесу зміни швидкості вала вільної турбіни в процесі раскрутки ротора ГТД, визначеної перевагою двигателя.

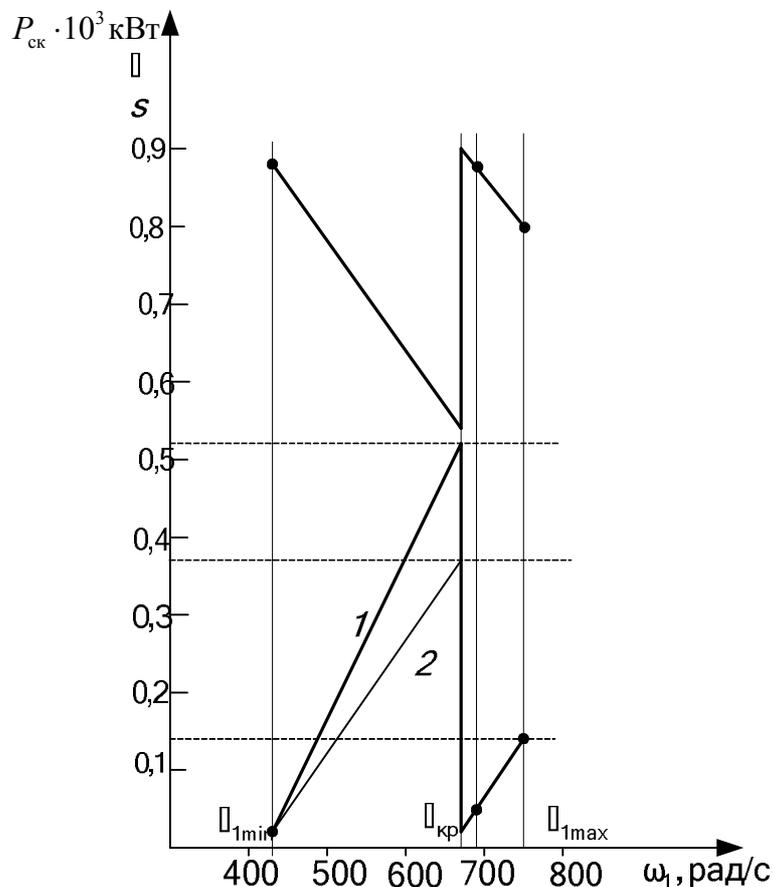


Рис. 2. Графік залежності енергетичних показників двохступінчатого ЕДР з полюсопереключаємої АМ від швидкості обертання входного вала для варіанта виконання $p_{CM} = 2$, $\frac{P_{AM}}{P_{AM1}} = 2/7$: 1 – графік залежності потужності втрат ковзання від швидкісного діапазона; 2 – графік залежності ковзання від швидкісного діапазона; 3 – графік залежності КПД ЕДР від швидкісного діапазона

Розрахункові дані та енергетичні показники ЕДР з використанням режиму прямої передачі (возбудження обмотки ведучого ротора здійснюється випрямленим током) с

различным сочетанием количества пар полюсов СМ и АМ в исследуемых режимах работы ГТД представлены в табл. 5 и 6.

В табл. 5 приведены рассчитанные значения минимальной и максимальной скоростей вращения входного вала ЭДР, скорости входного вала в крейсерском режиме полета и при переключении ступеней ЭДР, а также значения скольжения в установившихся режимах работы ГТД.

Таблица 5

Расчетные данные трехступенчатого ЭДР с повышающей, прямой и понижающей передачами

| $P_{см}$ | $P_{ам}$ | $\omega_{1min}/\omega_{1max}$ | Скорость вращения входного вала при переключении $\omega_{1пер1}$, рад/с | Скорость вращения входного вала при переключении $\omega_{1пер2}$, рад/с | Величина скорости входного вала в крейсерском режиме полета $\omega_{\text{ед}}$, рад/с | Величина скольжения в установившихся режимах работы ГТД | | |
|----------|----------|-------------------------------|---|---|--|---|---------------------|------------------------|
| | | | | | | ЗМГ $s_{зmg}$ | крейсера $s_{кр.р}$ | максимальном s_{max} |
| 1 | 5 | 720/1250 | 864 | 1100 | 1150 | 0,03 | 0,06 | 0,17 |
| 1 | 6 | 740/1300 | | 1000 | 1200 | 0,03 | 0,12 | 0,24 |
| 2 | 9 | 700/1250 | | 1110 | 1140 | 0,03 | 0,03 | 0,13 |
| 2 | 10 | 720/1250 | | 1100 | 1150 | 0,03 | 0,06 | 0,17 |

Таблица 6

Расчетные энергетические показатели трехступенчатого ЭДР с повышающей, прямой и понижающей передачами

| $P_{см}$ | $P_{ам}$ | s_{1max} | s_{2max} | s_{3max} | ΔP_{1max} кВт | ΔP_{2max} кВт | ΔP_{3max} кВт | $\Delta P_{кр.р}$ кВт | $\Delta P_{зmg}$ кВт | η_{1min} | η_{2min} | η_{3min} (η_{max}) | $\eta_{кр.р}$ | $\eta_{зmg}$ |
|----------|----------|------------|------------|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------|
| 1 | 5 | 0,19 | 0,22 | 0,17 | 20 | 24,5 | 17 | 5,6 | 2,6 | 0,7 | 0,79 | 0,77 | 0,87 | 0,84 |
| 1 | 6 | 0,17 | 0,19 | 0,22 | 17 | 20 | 24,5 | 12 | | 0,79 | 0,82 | 0,73 | 0,83 | |
| 2 | 9 | 0,2 | 0,25 | 0,13 | 22 | 27,5 | 12,5 | 1,5 | | 0,75 | 0,78 | 0,8 | 0,9 | |
| 2 | 10 | 0,19 | 0,22 | 0,17 | 20 | 24,5 | 17 | 5,6 | | 0,7 | 0,79 | 0,77 | 0,87 | |

Проведенный сравнительный анализ расчетных энергетических показателей трехступенчатого ЭДР на основе данных табл. 5 и 6 позволяет сделать вывод, что наилучшими показателями обладает трехступенчатый ЭДР с соотношением количества пар полюсов СМ и АМ 2/9. Значения мощности потерь скольжения, выделяемых в ведомом роторе, составляют 2,6 кВт в режиме ЗМГ и крейсерском и 13 кВт в максимальном режиме работы. Максимальные величины потерь скольжения, выделяемые в ведомом роторе ЭДР в переходном режиме работы ГТД, на повышающей ступени составляют 22 кВт, а на прямой - 27,5 кВт и 12,5 кВт на понижающей ступени работы ЭДР. При таких величинах потерь скольжения КПД ППС на основе ЭДР рассматриваемой конструкции составляет 0,84 в режиме земного малого газа, 0,9 в крейсерском режиме и 0,8 в максимальном установившихся режимах работы ГТД. Минимальное значение КПД при максимальном уровне потерь на повышающей передаче снижается до 0,75 и на прямой передаче равно 0,78. Общий скоростной диапазон разбивается на три ступени: первую ступень регулирования составляет изменение скорости от 720 (соответствует скорости вращения входного вала ЭДР при работе авиадвигателя в режиме ЗМГ) до 864 рад/с, вторая ступень – от 864 до 1100 рад/с, изменение скорости от 1100 до 1250 рад/с (соответствует скорости вращения входного вала ЭДР при максимальном режиме работы ГТД) – третью ступень регулирования. Скорость вращения входного вала ЭДР при работе авиадвигателя в крейсерском режиме – 1150 рад/с.

Часть графиков зависимости рассчитанных энергетических показателей от скорости вращения входного вала ЭДР для выбранного соотношения количества пар полюсов СМ и АМ показаны на рис. 3, где точки на графиках соответствуют значениям величин скольжения, мощности потерь скольжения и КПД ЭДР в установившихся режимах работы ГТД. Как видно из графика, мощность потерь скольжения, выделяемая в процессе разгона ротора свободной турбины ГТД, значительно ниже, чем в случае использования двухступенчатых ЭДР различной конструкции. Следовательно, с точки зрения энергетической эффективности наилучшим вариантом исполнения ЭДР является именно трехступенчатый ЭДР с использованием режима прямой передачи.

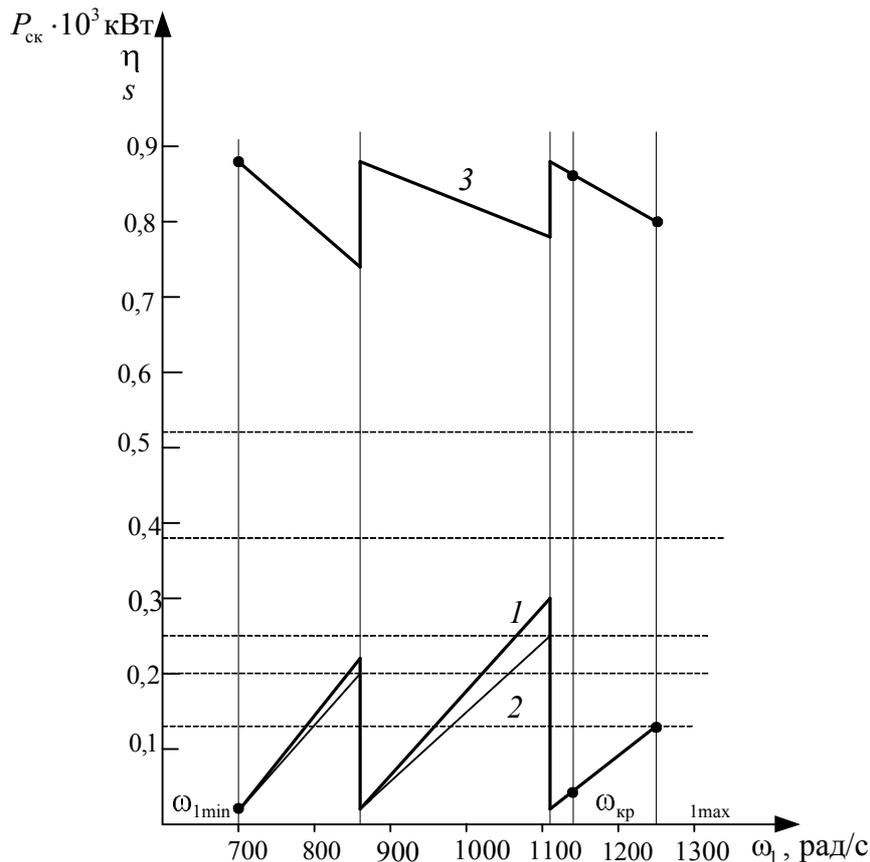


Рис. 3. График зависимости энергетических показателей трехступенчатого ЭДР от скорости вращения входного вала для варианта исполнения $p_{СМ} = 2$, $p_{АМ} = 9$:

1 – график зависимости мощности потерь скольжения от скоростного диапазона; 2 – график зависимости скольжения от скоростного диапазона; 3 – график зависимости КПД ЭДР от скоростного диапазона

Выводы. Результаты проведенного анализа расчетных энергетических показателей ЭДР трех вариантов исполнения в установившихся режимах работы ГТД позволяют сделать выводы о возможности рекомендации по выбору конструктивных параметров (соотношения количества пар полюсов АМ и СМ ЭДР) для каждой из предложенных выше конструкций ЭДР. Поэтому для ППС на основе ЭДР с повышающей и понижающей передачами наиболее целесообразным вариантом исполнения будут СМ и АМ с соотношением количества пар полюсов $\frac{p_{СМ}}{p_{АМ}} = 2/9$.

Для ППС на основе ЭДР с полюсопереключаемой АМ соотношения чисел пар полюсов выбираются $p_{Ni} = 2$ и $\frac{p_{СМ}}{p_{АМ}} = 2/7$ для СМ и АМ соответственно. И для ППС с трехступенчатой

конструкцией ЭДР – число пар полюсов СМ и АМ $p_{СМ} = 2$, $p_{АМ} = 9$. Наилучшим вариантом исполнения ЭДР с точки зрения энергетической эффективности является трехступенчатый ЭДР с использованием режима прямой передачи. Однако стремление уменьшить величину потерь скольжения за счет увеличения количества ступеней регулирования приводит к усложнению конструкции ЭДР за счет усложнения конструкции вращающегося коммутационного устройства, а так же необходимости питания обмотки ведущего ротора АМ выпрямленным током. Выполнение ЭДР с полюсопереключаемой АМ так же имеет особые трудности, связанные с выполнением обмотки АМ и усложнением конструкции магнитного переключателя. Таким образом, наилучшим вариантом применения в качестве ППС бортовой системы генерирования переменного тока постоянной частоты является двухступенчатый ЭДР с повышающей и понижающей передачами. Приведенные сравнения имеют предварительный характер, а задача дальнейших исследований состоит в разработке конструкции машин ЭДР, удовлетворяющих заданным требованиям.

Список литературы

1. Мазур Т. А., Романюк В. Е. Електромеханічні системи генерування змінного струму постійної частоти // Вісник НАУ. – 2008. – № 1 – С. 67 – 73.
2. Красношанка М. М. Генераторы переменного тока стабильной и регулируемой частоты. – К.: Техніка, 1974. – 168 с.
3. Красношанка М. М. Теория и расчет электродинамических редукторов с регулируемым передаточным отношением. – К.: КВИАВУ ВВС, 1967. – 135 с.
4. Смирнов Н. Н. Техническая эксплуатация ЛА. М.: Транспорт, 1990.

Т. А. Мазур.

Особливості вибору конструктивних параметрів машин електродинамічного редуктора з урахуванням різних режимів експлуатації

Наведено рекомендації щодо вибору конструктивної схеми приводу постійної швидкості обертання на базі електродинамічного редуктора для бортових систем генерування змінного струму постійної частоти літальних апаратів з урахуванням специфіки режимів роботи їх двигунів.

T. A. Mazur

Features of choice of structural parameters of electrodynamic reduction unit taking into account different modes of exploitation

The features of choice of structural chart of drive of constant-speed of rotation on the base of electrodynamic reducing gear for the side systems of generating of alternating current of permanent frequency of aircrafts taking into account the specific of the modes of operations of their engines.