

9. ArmelLeBail. Курс лекций по рентгеноструктурному анализу, руководство по пользованию SDPD-D (база данных по определению структуры из данных дифракции).

<http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/armel/tutorials.html>.

10. Rumer Yu.B. Thermodynamics, statistical physics and kinematics / Yu.B. Rumer, M.Sh. Rybkin. M.: Nauka. 1977. P.552.

## УДК 534.2

DOI: 10.34046/aumsuomt102/23

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА ВИНТОВ МАЛОГО МАСШТАБА

*В.В. Руденко, научный сотрудник кафедры аэрогидродинамики (Украина)*

*И.П. Бойчук, кандидат технических наук, доцент*

*А.В. Гринек, канд. техн. наук, доцент*

В работе показаны результаты экспериментального исследования шума винтов, выполненных в шумозаглушенной камере. Винты дизайна F7/A7, напечатанные на 3D принтере, исследовались на частоте вращения до 10000 об/мин. Диаметр модельных винтов выбирался до 0.16 м. Регистрация шума изолированных винтов показала наличие тональной и широкополосной составляющей шума. В шуме соосных противовращающихся винтов доминирует широкополосная составляющая. Определен вклад в широкополосный шум винтов шумовых характеристик бесколлекторных электродвигателей, которые используются в экспериментах.

**Ключевые слова:** акустические измерения дальнего поля, широкополосный шум

### EXPERIMENTAL STUDIES OF THE SMALL-SCALE ROTORS NOISE

*V.V. Rudenko, I.P. Boychuk, A.V. Grinek*

The paper shows the results of the experimental study of rotor noise. The research was performed in a noise-attenuated chamber. Rotors of F7/A7 design were printed on a 3D printer. The rotors were investigated at speeds up to 10000 rpm. The model rotors are up to 0.16 m in diameter. Noise registration of the isolated rotors showed the presence of a tonal and broadband noise component. Noise of coaxial counter-rotating open rotors is dominated by a broadband component. The contribution of the noise characteristics of commutatorless electric motors used in the experiments to the broadband noise of rotors is shown. The contribution of experimental commutatorless motors to the rotor noise characteristic is determined.

**Key words:** acoustic far-field measurements, broadband noise.

#### 1. Introduction

В настоящее время важна проблема определения акустических нагрузок, возникающих при взлете и посадке транспортных средств, в частности винтовых самолетов и экранопланов. В этом плане важным вопросом является снижения акустического воздействия на окружающие объекты. Эта проблема связана с определением уровня широкополосного шума соосных воздушных винтов. Поскольку лопасти винта служат источником широкополосного шума, что создает неблагоприятное воздействие на природу и человека, то снижение акустических нагрузок является важной и актуальной научно-технической проблемой.

Винты современных авиационных двигателей, а особо винты открытого ротора, представляют собой сложный с точки зрения технологического процесса и требований к качеству изготовления объект. Разработка винтов связана с целым рядом вопросов: аэродинамикой и динамикой, конструкцией и технологией изготовления, контролем [1]. В то время как преимущество

пропульсивной эффективности противовращающегося открытого ротора над обычным турбовентиляторным двигателем неоспоримо, из-за проблемы с установкой и шумом открытые роторы не нашли коммерческого применения [2, 3]. Возможно, наиболее неприятной проблемой является шум взаимодействия, вызванный богатым тональным содержанием противовращающихся винтов.

Экспериментальные испытания винтов ограничены определенными параметрами: сложностью и дороговизной современного экспериментального оборудования, а также сложностью производства винтов. С созданием оборудования и развитием методов трехмерной печати появилась возможность изготовления сложных, мелко-масштабных объектов с высоким разрешением. Это ведет к снижению затрат на производство экспериментальных моделей винтов.

В настоящей работе представлен опыт экспериментального исследования шума винтов малых масштабов.

## 2. Materials and methods

При проведении акустических исследований с соосными воздушными винтами предполагалось для уменьшения габаритов силовой установки применение такой схемы, которая позволила бы экранировать акустическое излучение от винтов при сохранении тяговых характеристик.



Рисунок 1 – Трехмерная модель винта

### 2.1. Оборудование

Исследования по измерению шума проводились в шумозаглушенной камере (рисунок 2) Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков. Основные характеристики камеры:

- объем после заглушения - 62 м<sup>3</sup> (камера с поглощающим полом);
- рабочий диапазон частот 1/3 октавных полос частот, Гц - 160 ... 10 000 Гц;
- вид заглушения - клинья ППУ EL2240;
- отклонения от условий свободного поля ≤ 1.5 Дб.

Измерительная аппаратура RFT (Германия) вмонтирована в потолок камеры и включает:

- узкополосный фильтр – 01020;
- микрофон 1/4" МК 202;

Испытания проводились для модельных одиночных и противовращающихся винтов дизайна F7/A7 11 и 9 лопастей соответственно на переднем и заднем винтах. Дизайн винтов выбирался согласно [4]. Винты были напечатаны по твердотельной геометрической модели, показанной на рисунке 1 [5].

- самописец уровня – 02013;
- координатное устройство на базе поворотного стола RFT 02012. Радиус измерения 1.6 м.

При проведении исследований контроль режимов работы силовой установки проводился:

- цифровым тахометром «Hangar 9 Micro Digital Tachometer» с LCD дисплеем, измеряющий обороты 2-х, 3-х и 4-х лопастных воздушных винтов в диапазоне до 32000 об/мин.
- лазерным тахометром для измерения числа оборотов многолопастного ротора.

Аппаратура управления включает регуляторы скорости (ESC) и регуляторы числа оборотов - сервотестер.

Положение испытуемого образца и измерительной аппаратуры показано на рисунке 3.

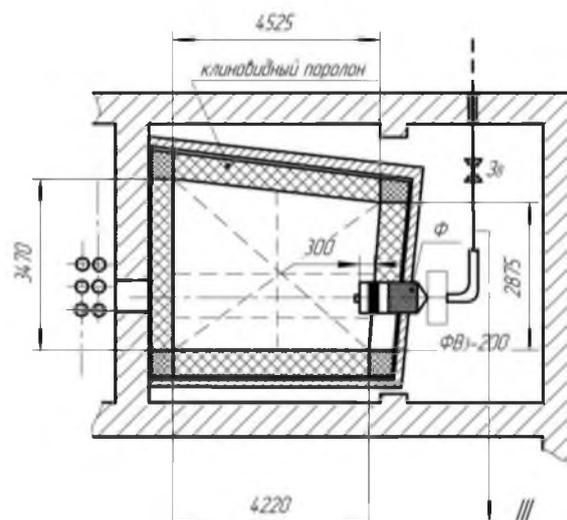


Рисунок 2 - Шумозаглушенная камера для аэроакустических исследований

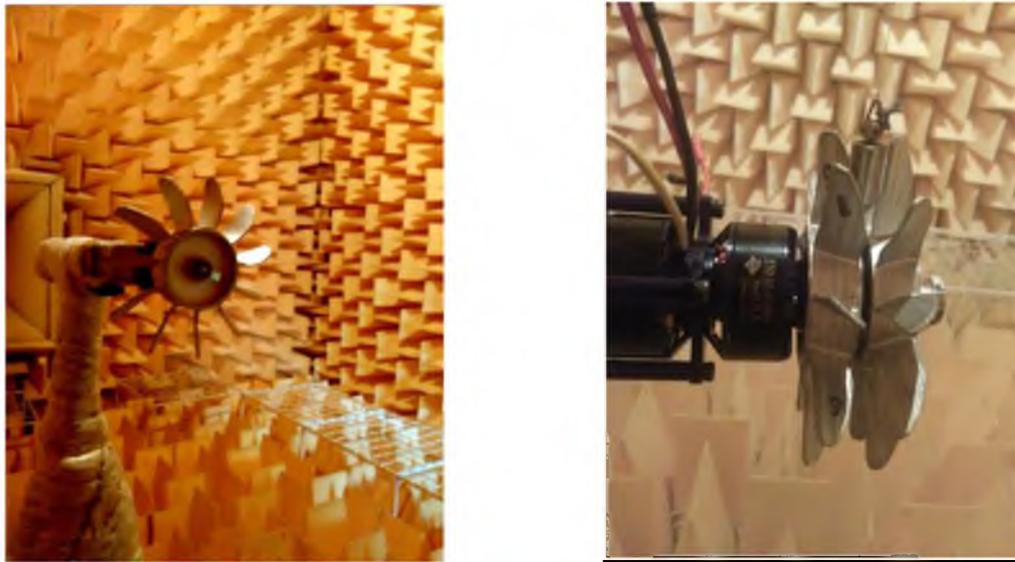


Рисунок 3 – Исследуемые винты в шумозаглушенной камере

### 3. Исследование шума

#### 3.1. Исследование шума бесколлекторных электродвигателей

Исследовался шум бесколлекторного электродвигателя «TURNIGY» G25870kV и соосного бесколлекторного электродвигателя «Himax Contra Rotating Motors» E50-65 610kV. Шум, создаваемый бесколлекторным электродвигателем, подразделяется на 3 категории: магнитный, механический и аэродинамический.

Измерения шумовых характеристик одноосного бесколлекторного электродвигателя

«TURNIGY» G25 870kV, имеющего одну опору (подшипник) проводились на ненагруженном электродвигателе. Измерения показали, что при частоте вращения вала  $n=168$  об/мин магнитный и аэродинамический шум выражены слабо. Основной компонентой является механический шум на частотах вращения вала двигателя и его гармоник. С ростом частоты вращения растёт механический шум на частоте вращения вала, в то время как шум на высших его гармониках уменьшается (рисунок 4).

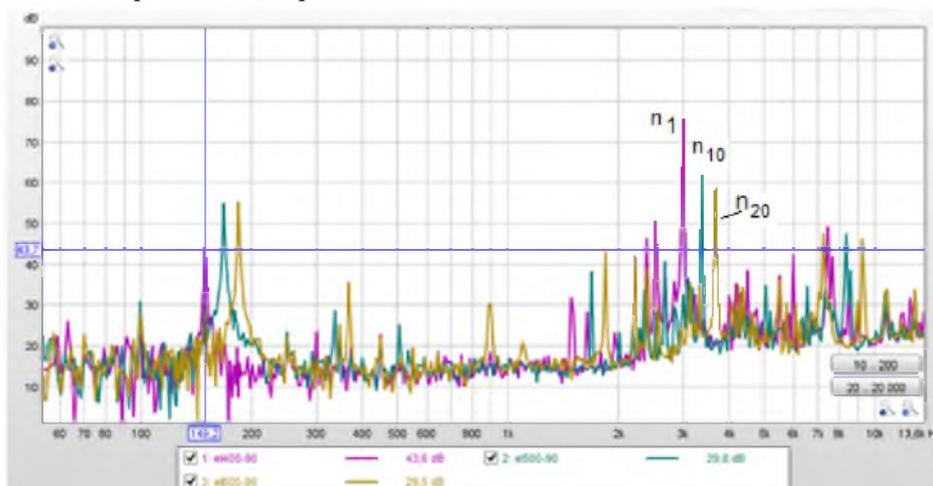


Рисунок 4 – Изменение спектральных составляющих шума двигателя с ростом частоты вращения вала: бесколлекторный электродвигатель G250 «Turnigy»,  $\alpha=90^\circ$   $n_1=168$  об/мин,  $n_{10}=1680$  об/мин,  $n_{20}= 3360$  об/мин

Сравнение спектров двигателей «TURNIGY» G25 870kV и соосного бесколлекторного электродвигателя «Himax Contra Rotating Motors» E50-65 610kV показало возрастание

механического шума на высших гармониках вращения у соосного бесколлекторного электродвигателя (рисунок 5). Это является следствием появившихся двух дополнительных опорных подшипников.

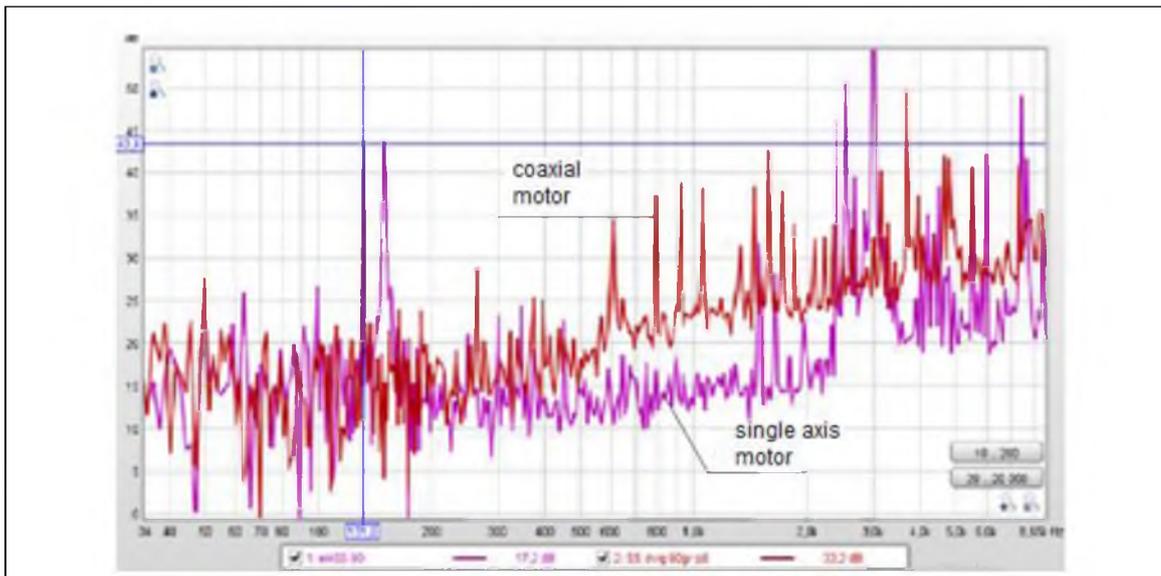


Рисунок 5 Сравнение спектров шума бесколлекторных электродвигателей, работающих без нагрузки

3.2. Исследование шума одиночных винтов

Диапазон частоты вращения винта в опытах составлял 3000-8500 об/мин. Диапазон измерения частотного спектра составляет 0-20000 Гц. При увеличении частоты вращения винта наблюдалось увеличение уровня звукового давления от 65 до 80 Дб (рисунок 6). При этом максимум звукового давления смещался в сторону высоких частот (рисунок 7), что связано, по-видимому, с увеличением турбулентности потока.

В области частот до 500 Гц наблюдаются гармоники, связанные с шумом вращения. В области частот выше 500 Гц наблюдается широкополосный шум, образующийся в результате

пульсаций аэродинамического давления на поверхности лопасти и турбулентных пульсаций скорости набегающего на диск винта потока и потока в вихревой пелене за лопастями винта. При этом до частоты вращения винта порядка  $n = 5500$  об/мин в области широкополосного шума наблюдаются отчетливые пики (рисунок 8), а при увеличении частоты вращения широкополосный шум имеет сплошной спектр (рисунок 9).

Для шума винта как на частоте  $n = 3048$  об/мин, так и  $n = 7320$  об/мин видны первые роторные гармоники (3 первых роторных гармоники для 3048 об/мин и две первых для 7320 об/мин). Это связано с большим шумом самого двигателя на этих частотах

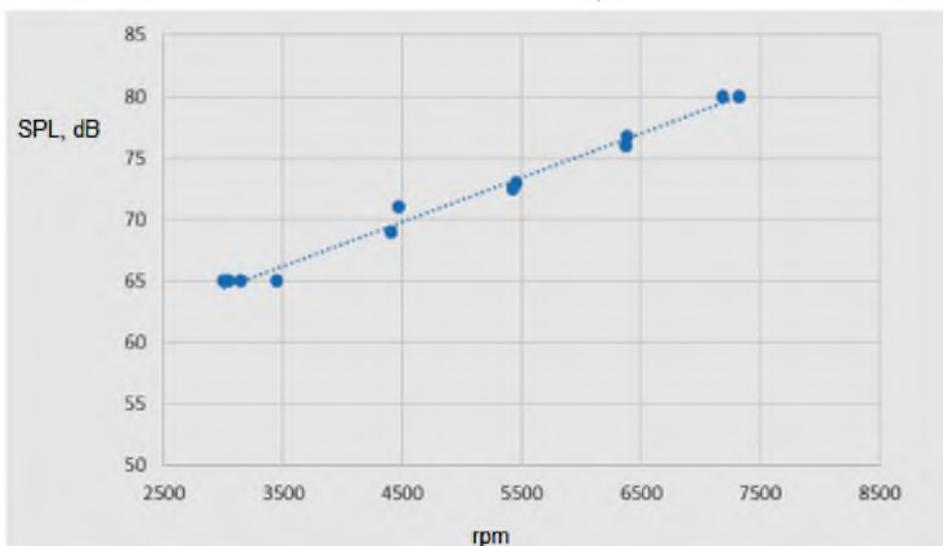


Рисунок 6 – Зависимость уровня звукового давления (SPL) от частоты вращения винта

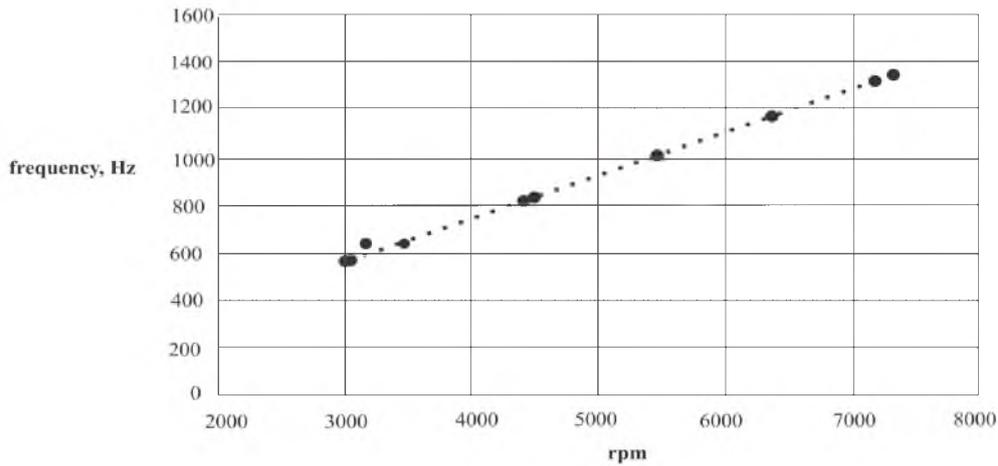


Рисунок 7 – Зависимость частоты, на которой достигается максимум звукового давления, от частоты вращения винта

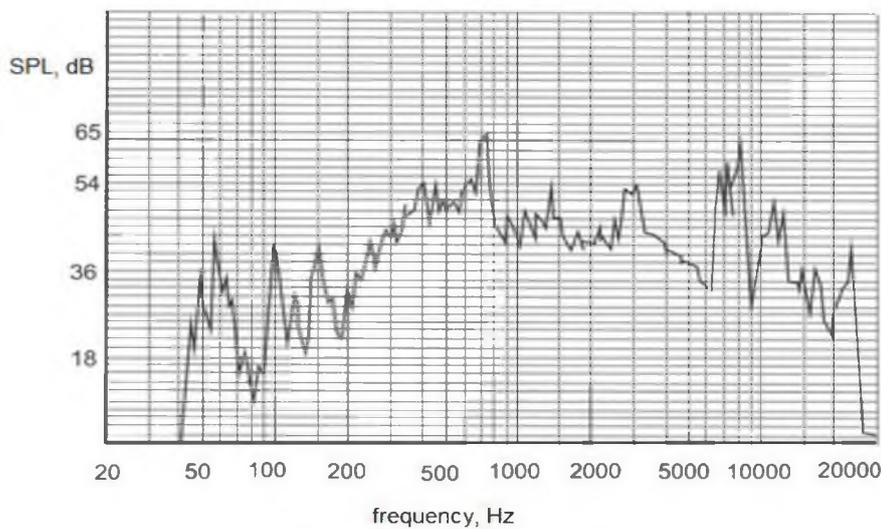


Рисунок 8 – Спектр шума винта:  $n = 3048$  об/мин

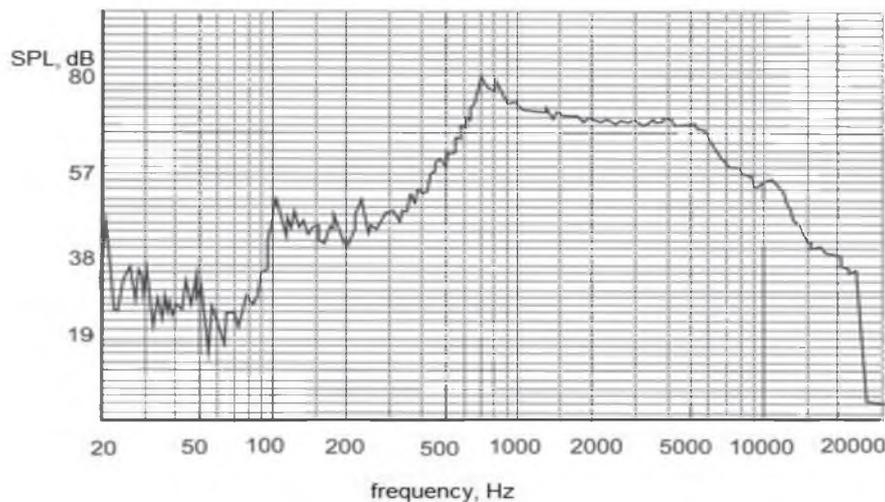


Рисунок 9 – Спектр шума винта:  $n = 7320$  об/мин

Усиление широкополосной составляющей шума винта может быть вызвано тем, что при увеличении оборотов при неизменном угле установки лопастей местные углы атаки набегающего потока на лопасть становятся большими,

что вызывает срыв потока. Эта ситуация соответствует обтеканию плохообтекаемого тела, поскольку профиль сечения задавался в виде плоской пластинки. Такое обтекание может приводить к значительному усилению широкополосного шума.

### 3.1. Исследование шума соосных винтов

Проведенные измерения шумовых характеристик ненагруженного соосного бесколлектор-

ного электродвигателя показало увеличение механического шума от 34,8 дБ на частоте 5580 об/мин до 42,2 дБ на частоте 7920 об/мин (рисунок 10).

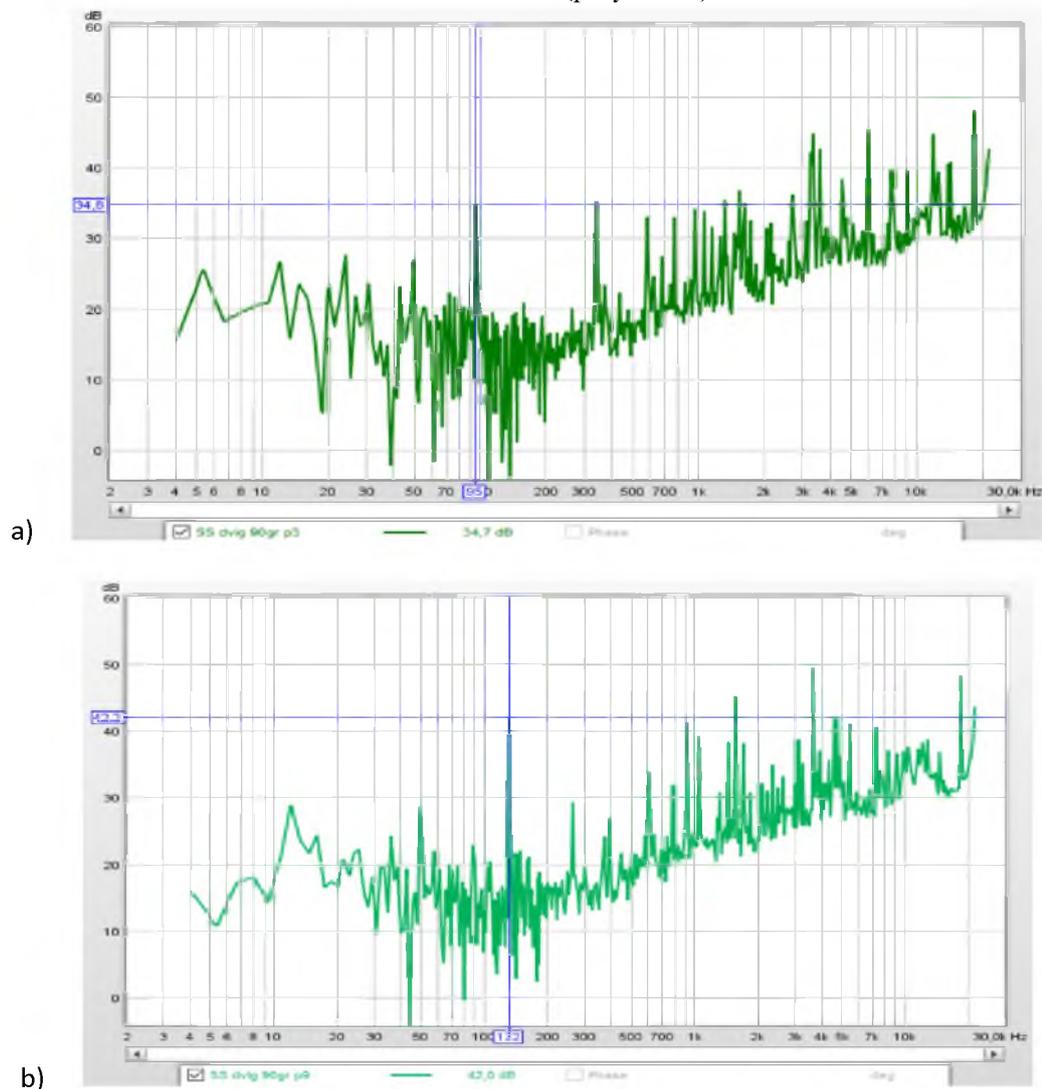


Рисунок 10 – Изменение амплитудно-частотных характеристик соосного электродвигателя с ростом числа оборотов ( $\alpha=90^\circ$ ): а)  $n=5580$  об/мин; б)  $n=7920$  об/мин

Сравнение интенсивности излучения основных источников шума – воздушных винтов, проводилось при постоянстве тяг силовых установок. Результаты измерений шума представлены на рисунке 11 (а, б, в). На графиках показан акустический спектр винтов типа F7/A7 (11 + 9 лопаток), полученный в эксперименте. А также показаны «суммы» тонов частоты следования лопастей:

$$f_{nm} = n \cdot BPF_1 + m \cdot BPF_2,$$

где  $BPF_1$ ,  $BPF_2$  – частота следования лопастей переднего и заднего винта соответственно,  $n$ ,  $m$  – целые числа. Анализируя рисунок 11, можно сделать вывод, что существуют тоны, которые могут быть скрыты в широкополосном шуме в зависимости от места нахождения наблюдателя.

Как можно отметить, спектр шума является широкополосным в широком диапазоне частот. Кроме того, в спектре наблюдаются и модулированные по амплитуде гармоники, кратные по частоте следования лопастей (комбинационные частоты). То есть, кроме обычных составляющих шума, имеющих в спектрах однорядно расположенных винтов (шума вращения и его гармоник, широкополосного шума), наблюдаются тональные составляющие на комбинациях следования лопастей винтов. Уровни шума на этих частотах равны, а на некоторых направлениях значительно выше, чем уровни шума на частотах следования лопастей первого и второго рядов.

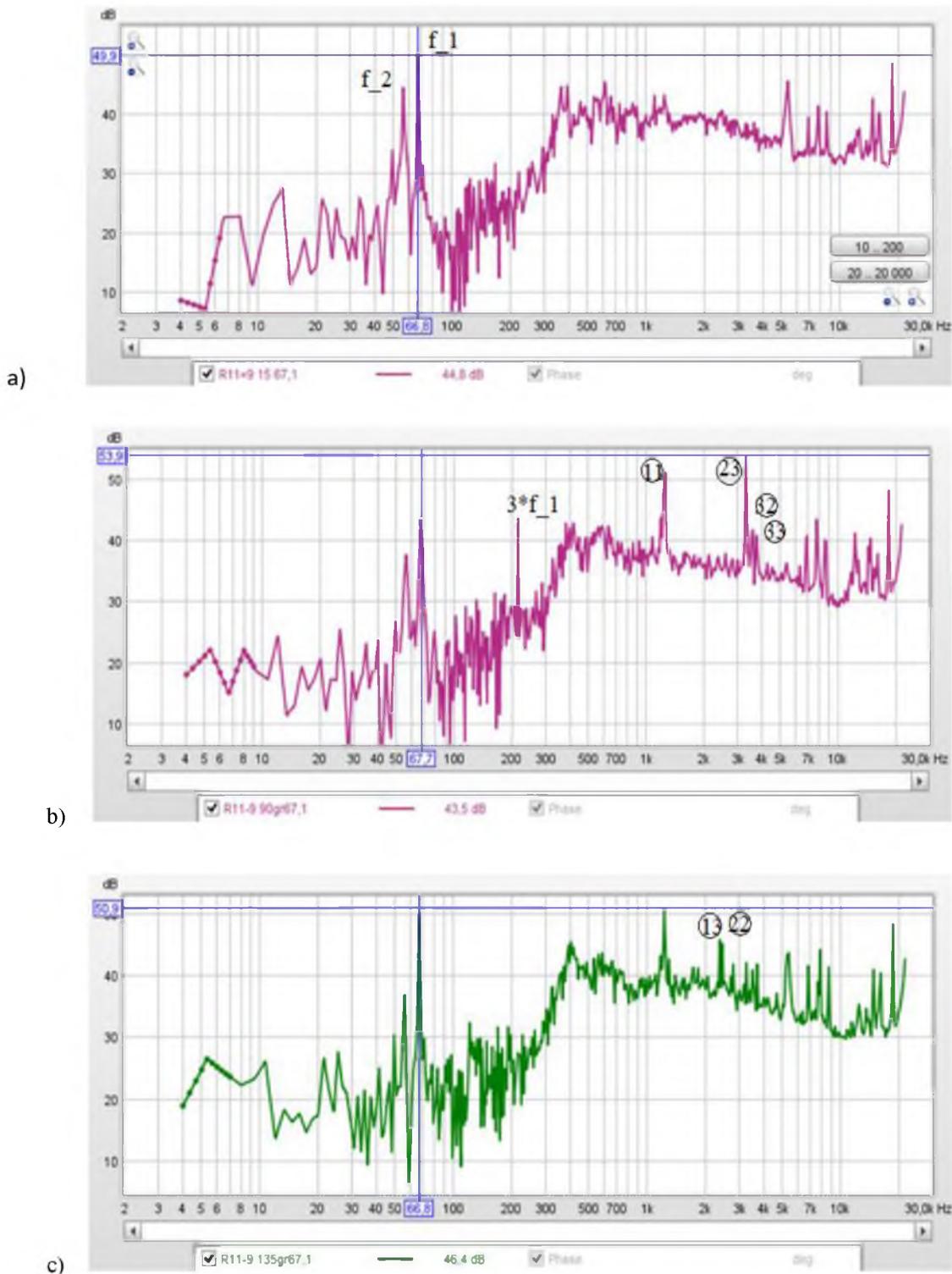


Рисунок 11 – Акустический спектр винтов типа F7/A7 (11 + 9лопатонок), зарегистрированный: (а) вверх по потоку – 15°, (b) в плоскости винтов – 90°, (с) ниже по потоку – 150°

Установлено уменьшение уровней шума у винтов с увеличением количества лопастей вследствие уменьшения аэродинамических нагрузок на лопасти и окружных скоростей. При этом необходимо учитывать влияние коэффициента заполнения ометаемого лопастями пространства. С его увеличением шум вращения

уменьшается, но значительно увеличивается вихревой шум.

#### 4. Заключение

Исследования шумовых характеристик одиночных винтов показало наличие тональных и широкополосных составляющих шума на не-

высоких скоростях вращения ротора. Для переносимости результатов на реальную геометрию требуются исследования при скоростях вращения винтов порядка 50000 об/мин. Исследования экспериментальных моделей на разрыв показало, что данные образцы не выдерживают таких скоростей вращения. Для повышения прочности образцов потребуется другая технология изготовления, как, например, в [6].

Большой шум самого электродвигателя приводит к четко наблюдаемым роторным гармоникам в спектре шума соосных винтов.

При соблюдении равенства тяг с увеличением диаметра уменьшаются уровни шума у винтов по причине уменьшения окружных скоростей.

Рассмотрение соосной (тандемной) схемы расположения винтов показало, что в спектре воздушных винтов присутствует, кроме традиционных компонент шума, тональный шум высокого уровня на комбинационных частотах.

#### Литература

1. Grinyok, A., Boychuk, I., Perelygin, D., Dantsevich, I. 2018 Simulation in production of open rotor propellers: From optimal surface geometry to automated control of mechanical treatment IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327 (2), 022038.
2. Замтфорт Б.С. Двигатель с открытым ротором в свете ужесточения требований по авиационной экологии // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – т.14. – №6. – С. 307-308.
3. Open Rotor Engine. Aeroacoustic Technology. Final Report. Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program. Submitted by General Electric. DOT/FAA/AEE2014-04 /by the FAA's Office of Environment and Energy.
4. Whitfield, C. E., Manl, R., Gillebe, P.R. (1990)

High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume I - Model Development. NASA Contractor Report 185241

5. Гринек А.В., Бойчук И.П., Косолап Ю.Г. Цифровое моделирование в жизненном цикле изделий и автоматизации технологических процессов судостроения // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 4 (93). – С. 100-114.
6. Truong A., Papamoschou D. Aeroacoustic Testing of Open Rotors at Very Small Scale. AIAA 2013-0217.

#### References

1. Grinyok, A., Boychuk, I., Perelygin, D., Dantsevich, I. 2018 Simulation in production of open rotor propellers: From optimal surface geometry to automated control of mechanical treatment IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 327 (2), 022038.
2. Zamtfort B.S. Dvigatel' s otkryтым rotorom v svete uzhestocheniya trebovaniy po aviaekologii // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2012, t.14, №6, str.307-308.
3. Open Rotor Engine. Aeroacoustic Technology. Final Report. Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program. Submitted by General Electric. DOT/FAA/AEE2014-04 /by the FAA's Office of Environment and Energy.
4. Whitfield, S. E., Manl, R., Gillebe, P.R. (1990) High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume I - Model Development. NASA Contractor Report 185241
5. Grinek A.V., Boychuk I.P., Kosolap YU.G. Cifrovoe modelirovanie v zhiznennom cikle izdelij i avtomatizacii tekhnologicheskikh processov sudostroeniya // Eksploataciya morskogo transporta. 2019. № 4 (93). S. 100-114.
6. Truong A., Papamoschou D. Aeroacoustic Testing of Open Rotors at Very Small Scale. AIAA 2013-0217.

УДК 536.2

DOI: 10.34046/aumsuomt102/24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

*Ж. Ж. Жумаев, доктор технических наук, профессор, (Республика Казахстан)  
С.Э. Смагулова, преподаватель, (Республика Казахстан)  
Ю.Г. Косолап, кандидат технических наук, доцент  
И.М. Данцевич, кандидат технических наук, доцент*

В статье приводится схема экспериментальной установки, позволяющей проводить исследование коэффициента теплопроводности электролитов в интервале температур до 523 оК и давления до 100Мпа. Особенность конструкции гидравлического пресса заключается в том, что размеры плунжерной пары позволяют создать необходимое давление в автоклаве при любой температуре от 293 оК до 523 оК, без дополнительной подачи исследуемого раствора в систему создания давления. Материал,