

УДК 62-83:621.313.333

И. В. Волков, д-р техн. наук,
В. П. Стяжкин, **Р. Э. Милько**, кандидаты техн. наук,
Г. В. Доманский

БЕЗРЕДУКТОРНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С ДУГОСТАТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Аннотация. Проведен анализ построения безредукторной электромеханической системы с дугостаторным электроприводом для радиолокационной станции. Приведены результаты разработки дугостаторного электропривода. Определены способы управления дугостаторным электроприводом в электромеханической системе.

І. В. Волков, д-р техн. наук,
В. П. Стяжкин, **Р. Е. Мілько**, кандидаты техн. наук,
Г. В. Доманський

БЕЗРЕДУКТОРНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА З ДУГОСТАТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ

Анотація. Проведено аналіз побудови безредукторної електромеханічної системи з дугостаторним електроприводом для радіолокаційної станції. Наведені результати розробки дугостаторного електроприводу. Визначені способи керування дугостаторним електроприводом в електромеханічній системі.

I. V. Volkov, ScD,
V. P. Stjzhkin, **R. J. Mil'ko**, PhD,
G. V. Domanskij

DIRECT ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH ELECTRIC DUGOSTATORNYM FOR RADAR

Abstract. The analysis of the reducer free radar installation electromechanical system construction with arched stator asynchronous electric drive is carried out. The results of the arched stator asynchronous electric drive development are adduced. The arched stator asynchronous electric drive control methods at the radar installation are determined.

Актуальная задача сегодняшнего дня в судостроении – производство оборудования, устанавливаемого на судах, которое по показателям надежности и долговечности соответствовало бы сроку службы современного корабля (15-20 лет). Особенно высокие требования по надежности предъявляются к навигационным системам, обеспечивающим безопасность плавания судна в любой точке акватории мирового океана в любых погодных условиях.

Технический ресурс современных навигационных радиолокационных станций (РЛС) составляет 2000 – 10000 ч в течение 5-6 лет. Следовательно, за срок службы корабля его навигационное оборудование будет заменено 4-6 раз. Для исключения этого сегодня ставится задача создать радиолокационное оборудование с техническим ресурсом 25000-30000 ч [4].

Одним из основных устройств любой РЛС является антенна, вращение которой осуществляется посредством электропривода (постоянного или переменного тока) с редуктором. Редуктор необходим, так как скорость вращения навигационных антенн лежит в пределах от 10 до 60 об/мин. Каждая ступень редуктора имеет десять главных поверхностей износа: четыре подшипника, четыре цапфы двух валов и две поверхности зацепления зубьев шестерен. Электродвигатель также имеет два подшипника и вал с двумя цапфами, которые вращаются с высокой скоростью. Износ этих элементов и определяет долговечность и надежность электропривода антенны в целом.

© И.В. Волков, В.П. Стяжкин, Р.Э. Милько,
Г.В. Доманский, 2011

По эксплуатационным показателям надежности и долговечности электронная часть РЛС и электропривода, выполненная на современном уровне, на несколько порядков превосходит силовую часть электропривода антенны, которая в течение последних десятилетий не претерпела существенных изменений.

Повышение надежности и долговечности силовой части электропривода можно достичь двумя путями.

Первый путь – применение высококачественных конструкционных материалов (инструментальные, износостойкие, легированные стали, долговечные смазки и т.д.), прецизионных подшипников, прецизионного изготовления всех деталей (шестерен, валов и т.д.), селективной сборки и новейшей технологии. Однако этот путь однозначно определяет резкое повышение стоимости и трудоемкости изготовления элементов электропривода антенны, а главное, не дает существенного выигрыша – надежность и долговечность повысится на 20-25 %.

Второй путь – создание безредукторного электропривода, что является современной тенденцией развития этой отрасли техники. Органическое объединение «машины-двигателя» и «машины-орудия», их сращивание в единое целое. Такое объединение позволяет отказаться от редуктора, упрощает установку, делает ее более надежной и долговечной. Электрическая машина становится частью рабочей машины.

Как известно [4], существуют две принципиальные возможности получения малых скоростей вращения:

- создание тихоходного электродвигателя со скоростью вращения ротора, равной скорости вращения антенны;
- создание дугостаторного электропривода на базе асинхронного электродвигателя.

Из-за плохого охлаждения тихоходные машины характеризуются малыми значениями КПД, коэффициента мощности и удельной мощности на единицу активной поверхности. Кроме этого, круговой статор имеет большое количество полюсов и катушек обмотки и поэтому сложен в изготовлении. Эти недостатки определили отказ от его применения в электроприводе РЛС.

Асинхронный двигатель может работать с малой скоростью, если выполнить его с дуговым статором вместо кругового [6]. При этом имеет место электромагнитная редукция. Если условно разомкнуть круговой статор обычного асинхронного двигателя и разгибать его в дуги возрастающего радиуса r_1, r_2 (рис.1) до получения центрального угла α , то между частотами вращения и центральными углами дугового (α)

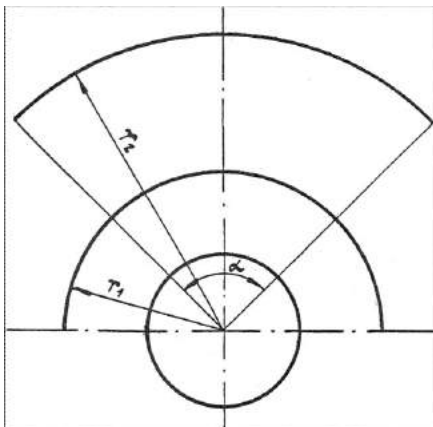


Рис.1. Преобразование кругового статора в дуговой

и кругового (2π) статоров справедливо соотношение

$$\frac{n'}{n} = \frac{\alpha}{2\pi} = \alpha^*, \quad (1)$$

где штрих (') - обозначает величины, относящиеся к круговому статору; n – частота вращения; α – центральный угол дугового статора; α^* – относительный угол дуги статора, выраженный в долях от 2π .

Известно выражение для синхронной частоты вращения круговой машины

$$n' = \frac{f}{p'}, \quad (1/c) \quad (2)$$

где f – частота сети переменного тока; p' – число пар полюсов машины.

Для дугового статора

$$n = \frac{f \alpha^*}{p} \quad (1/c). \quad (3)$$

Таким образом, если частоты вращения круговой и дуговой машины одинаковы ($n = n'$), то из выражений (2) и (3) следует

$$p = \alpha^* \cdot p'. \quad (4)$$

Значения α^* могут принимать значения от 0 до 1, т.е. $0 \leq \alpha^* \leq 1$ ($\alpha^* = 0$ – для линейного статора; $\alpha^* = 1$ – для круговой машины).

Например, если синхронная частота вращения должна быть равна 0,5 1/с, то при частоте сети 50 Гц число пар полюсов у круговой машины должно быть, согласно выражению (2), $p' = 100$, а для дуговой машины с центральным углом $\alpha^* = 0,1$ число пар полюсов составит, согласно (4), $p = 10$.

Таким образом, дугостаторные машины сочетают малое число полюсов с малой частотой вращения, осуществляя электромагнитную редукцию скорости, и позволяют получать ряд синхронных частот вращения. Благодаря этим свойствам дугостаторных машин на их базе можно создать системы электропривода без механических передач.

Необходимо отметить еще одну особенность асинхронных дугостаторных машин, которая имеет огромное значение для безредукторного привода антенн, это возможность применения в качестве ротора любого токопроводящего слоя материала (сталь, алюминий, медь и др.). Конструкция индукторов, из которых состоит статор, аналогична конструкции обычных трансформаторов и, следовательно, показатели надежности их аналогичны.

Таким образом, разработка дугостаторного электропривода антенны дает возможность получить качественно новые показатели надежности и долговечности, так как исключается вся кинематическая цепь зубчатых передач и высокооборотный электродвигатель, а остаются только два тихоходных подшипника, в которых вращается антенна.

Так как скорости вращения антенн современных РЛС лежат в пределах от 10 до 60 об/мин, то срок службы подшипников обеспечивает технический ресурс работы электропривода антенны в течение 50-60 тыс. часов.

В обычном редукторном электроприводе динамические параметры последнего определяются соответствующими параметрами электродвигателя (постоянной времени, моментом инерции и т.д.), так как момент инерции антенны, приведенный к валу двигателя, составляет обычно до 10-15 % от величины момента инерции электродвигателя.

В безредукторном электроприводе поле индукторов непосредственно воздействует на подвижную часть антенны, которая используется как ротор двигателя, и на нее же непосредственно воздействует ветровая нагрузка. Этот фактор необходимо учитывать при разработке электропривода, так как отсутствует демпфирующее влияние вращающегося с большой скоростью ротора электродвигателя при пиковом характере ветровой нагрузки на антенну. Это накладывает качественно новые требования на систему стабилизации скорости вращения антенны, требует более точного анализа воздействующих нагрузок, комплексного подхода к

проектированию антенного поста, системы управления электроприводом в целом.

Исследования и разработка безредукторных дугостаторных электроприводов навигационных РЛС проводились на базе серийно выпускаемой РЛС «Миус». Антенна РЛС «Миус» – щелевая открытого типа.

Электропривод должен обеспечить равномерное вращение антенны с заданной скоростью (точность поддержания – не хуже 5-10 %) при скоростях ветра до 50 м/с.

Так как антенна открытого исполнения, основную часть нагрузок составляют аэродинамические усилия, возникающие ввиду парусности антенны при ее вращении под воздействием ветра.

Расчет аэродинамических нагрузок произведен по методике [2].

Аэродинамический момент, действующий на ось антенны, определяется

$$M = m \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot H \cdot L^2, \quad (5)$$

где плотность воздуха $\rho = 1,32 \text{ кг/м}^3$; m – коэффициент аэродинамического момента; V – скорость воздушного потока; H – высота профиля антенны; L – длина антенны;

Коэффициент аэродинамического момента m является функцией угла поворота антенны β и определяется

$$m = k(m_{CT} + m_D), \quad (6)$$

где $k = 1,2$ – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние кронштейна на аэродинамическое сопротивление антенны

$$m_{CT} = m_{CT}^0 \cdot \sin 2\beta; \quad m_{CT}^0 = \frac{\lambda n}{\lambda}. \quad (7)$$

Динамическая составляющая аэродинамического коэффициента

$$m_D = \frac{1}{3} S n \cdot \cos \beta \cdot C n (1 + \frac{1}{8} k' \cdot \lambda) \quad (8)$$

для угла β , лежащего в I и 4-й четвертях оборота антенны, и

$$m_D = -\frac{1}{3} S n \cdot \cos \beta \cdot C n (1 + \frac{1}{8} k' \cdot \lambda) \quad (9)$$

для угла β , лежащего в 2 и 3-й четвертях оборота антенны. В выражениях (7) – (9): $S n$ – поперечное сечение профиля антенны; $\lambda n = \frac{S n}{H^2}$ – приведенное уд-

линение профиля; $\lambda = \frac{L}{H}$ – удлинение профиля;

ω – угловая скорость антенны;

$$S n = \frac{\omega \cdot L}{2 \cdot V} \text{ – число Струхала.}$$

Подставляя в формулы (5-9) значения коэффициентов и параметров, взятых для антенны РЛС «Миус», получим значения момента аэродинамической нагрузки. По данным расчетов для скоростей воздушного потока от 10 до 60 м/с с шагом 5 м/с за один оборот построены графики ветровых нагрузок (рис.2), которые показывают, что нагрузка на электропривод антенны РЛС «Миус» при вращении подчиняется гар-

моническому закону с частотой, равной удвоенной частоте вращения антенны.

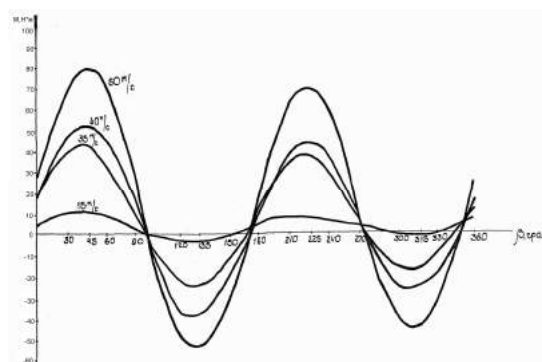


Рис.2. График аэродинамических нагрузок антенны

Максимальное значение момента (рис.2) составляет 78,46 Н·м при скорости ветра 50 м/с.

Следовательно, электропривод должен быть рассчитан на преодоление этой величины нагрузочного момента, так как и нагрузка и тяговое усилие индукторов непосредственно воздействуют на антенну, установленную и сбалансированную в опорных подшипниках (рис.3).

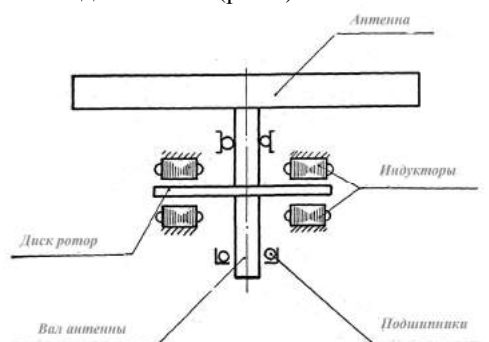


Рис.3. Схема конструктивная антенны РЛС с безредукторным приводом

Скорости ветра являются случайными величинами, зависящими, в частности, от нахождения судна в заданном районе плавания в определенное время года. Кроме этого, результирующая скорость воздушного потока (векторная сумма скоростей ветра и судна) также случайная величина. Отсутствие статистических закономерностей не позволяет определить вероятностные характеристики этих величин (математическое ожидание и дисперсию), поэтому при расчете нагрузок приходится ориентироваться на несколько завышенные данные по режимам скоростей ветра.

На основании таких данных и произведен расчет максимальных аэродинамических нагрузок на электропривод. Однако для проектирования всей системы управления антенной РЛС в целом этих данных явно недостаточно, особенно при проектировании безредукторного электропривода. Спроектированный безредукторный электропривод антенны РЛС «Миус» состоит из 4-х индукторов (рис.3), следовательно, имеется возможность селективно подключать нужное их количество в соответствии с действующей в данный момент ветровой нагруз-

кой. Поэтому необходимо установить зависимость скорости ветра (и соответствующего ей момента нагрузки) от времени эксплуатации.

Из сопоставления нагрузочных характеристик привода (рис.4) и графика ветровых нагрузок (рис.2) следует, что при включении одного индуктора привод обеспечивает вращение антенны РЛС "Миус" при скоростях ветра до 15 м/с, включение двух индукторов обеспечивают работу антенны при скоростях ветра до 35 м/с, три индуктора обеспечивают работу при скоростях ветра до 40 м/с, а включение четырех индукторов необходимо 0,05 % времени в год, т.е. из 8760 ч годового баланса времени (при круглосуточной работе в течение года) антенна будет работать с четырьмя индукторами 4,38 часа.

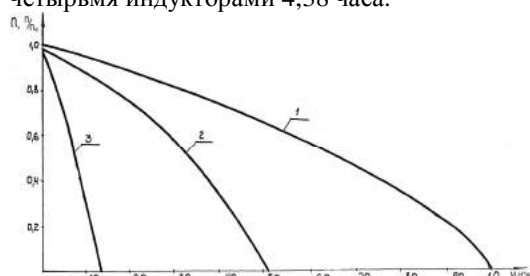


Рис. 4. Механические характеристики безредукторного привода: 1 – включены четыре индуктора, 2 – включены два индуктора, 3 – включен один индуктор

Таким образом, из приведенных данных, можно прийти к заключению, что при применении безредукторного электропривода для вращения антенн навигационных РЛС имеется возможность значительного повышения надежности за счет резервирования. Для этого необходимо разработать систему автоматического управления антенной с селективным дозированным включением индукторов в соответствии с внешней нагрузкой.

Возможны два варианта установки индукторов при разработке безредукторного электропривода антенны:

- индукторы устанавливаются на подвижной части антенны и вращаются вместе с ней, а ротор неподвижно закреплен в корпусе привода антенны;

- индукторы устанавливаются неподвижно в корпус привода, а ротор укреплен на оси вращающейся части антенны.

Первый вариант имеет преимущество в повышении массы и момента инерции антенны, а следовательно, и электрохимической постоянной времени. Так как ветровые нагрузки и тяговые усилия двигателя приложены непосредственно к вращающейся части антенны, то стабильность скорости вращения антенны при пиковом характере ветровой нагрузки повышается, т.е. при таком конструктивном исполнении привода антенны меньше установленная мощность индукторов, меньше их габариты и масса.

Однако есть целый ряд существенных недостатков такой компоновки:

- необходимо подавать питание индукторов на вращающуюся часть антенны, т.е. требуется вра-

щающееся контактное устройство, что снижает надежность;

- необходимо повышать мощность конструктивных элементов вращающейся части антенны для установок на ней индукторов привода;

- увеличение постоянной времени электропривода приводит к увеличению времени раскручивания антенны, однако этот недостаток не является существенным.

Эти недостатки обусловили выбор второго конструктивного выполнения привода антенны.

Расположение индукторов может быть двухсторонним и односторонним, однако два индуктора при двухстороннем расположении друг против друга обеспечивают в 2 раза большее тяговое усилие, чем при одностороннем расположении. Это подтверждают результаты эксперимента, приведенные на рис.5.

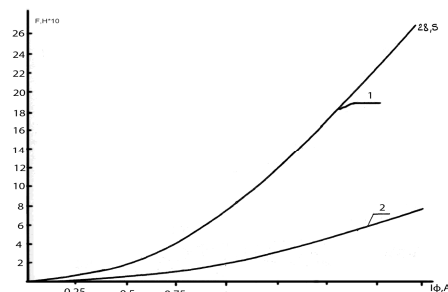


Рис.5. Зависимость силы тяги от схемы включения 1 – включено два индуктора (верхний), 2 – включен один индуктор

Был произведен расчет электропривода и выбор основных конструктивных параметров индукторов, изготовлена пара индукторов, произведены измерения их параметров и тяговых характеристик на лабораторной установке. По результатам этих испытаний уточнены и скорректированы обмоточные данные индукторов, а затем изготовлены рабочие индукторы для привода. Их механические характеристики в составе электропривода сняты на специальной нагрузочной установке и приведены на рис.6.

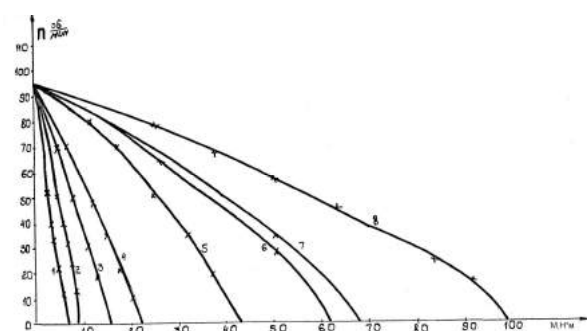


Рис. 6. Механические характеристики безредукторного электропривода при следующих значениях токов (А): 1 – 1,0; 2 – 1,2; 3 – 1,7; 4 – 1,9; 5 – 2,4; 6 – 2,9; 7 – 3,14, 8 – 3,8

Жесткость характеристик разработанного дугостаторного электропривода составляет 20 %, тогда как у общепромышленных асинхронных электродвигателей не превышает 7-10 %. Большая мягкость характеристик объясняется большой величиной воздушного зазора δ (у обычного электродвигателя $\delta \leq 0,5$ см), разомкнутостью магнитопровода и отсутствием обмотки на роторе.

При выбранном конструктивном исполнении электропривода и заданных параметрах вращения такие характеристики являются оптимальными. Однако если учесть непосредственное воздействие аэродинамических нагрузок и тяговых усилий индукторов на вращающуюся часть антенны, то нетрудно прийти к выводу, что заданная стабильность скорости непосредственно дугостаторным электроприводом обеспечена быть не может. Например, если нагрузка возрастает от 0 до 1 Н·м, что соответствует изменению скорости ветра от 0 до 15 м/с, то скорость вращения антенны изменится на 26 % (рис.4).

Следовательно, необходима система автоматического регулирования (стабилизации) скорости вращения антенны. САР определяет наличие в структуре регулируемого электропривода антенны силового преобразователя напряжения между питающей сетью и двигателем, который изменяя основную промежуточную переменную САР – ток двигателя, формирует контур регулирования момента двигателя.

Силовой преобразователь напряжения может реализовывать импульсный способ регулирования, при котором силовой тиристорный коммутатор подключает к сети или отключает от сети обмотки (индукторы) двигателя [4,5], или частотный способ регулирования, при котором силовой транзисторный преобразователь со звеном постоянного тока изменяет частоту и напряжение, подводимое к обмоткам дугостаторного двигателя [3].

В регулируемом приводе антенны задающее воздействие часто носит ступенчатый характер (секторный режим). При этом требуется, чтобы ошибка стабилизации скорости в установившихся и переходных режимах САР была мала, а быстродействие – максимально. Эта задача решается несколькими методами: регулированием по отклонению или комбинированным способом управления [3]. При регулировании по отклонению (устройство управления находится в замкнутом контуре регулирования) могут возникать автоколебания в новом установившемся состоянии. При комбинированном методе устройство управления находится в разомкнутом канале компенсационной связи, не влияющем на устойчивость замкнутого контура.

Список использованной литературы

1. Волков И.В. Системы стабилизированного тока для автоматизированных электроприводов / И.В. Волков, В.П. Стяжкин, С.В. Подольный // Пр. ін-ту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – Київ, 2009. – Вип. 23. – С. 64-72.

2. ОСТ5-8285-7 Щелевые антенны для РЛС. Аэродинамический расчет.

3. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы/ Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 128 с.

4. Стеклов В.А. Системы управления с безредукторным приводом/ В.А. Стеклов, Р.Э. Милько. – К.: Техніка, 1983. – 120 с.

5. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода/ Л.П. Петров, О.А. Андрущенко, В.И. Капинос, Р.Г. Подзолов, П.Э. Херунцев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

6. Фридкин П.А. Безредукторный дугостаторный электропривод / П.А. Фридкин – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1970. – 138 с.

Получено 12.07.2011



Волков
Игорь Владимирович,
докт. техн. наук,
зав. отделом Ин-та эл.
динамики НАН Украины,
03680 г. Киев -57,
пр. Победы, 56,
(044) 456-20-51
i.volkov@kv.ukrtel.net



Стяжкин
Виталий Павлович,
канд. техн. наук,
ст. науч. сотр.
Ин-та эл.динамики
НАН Украины, 03680 г. Ки-
ев -57, пр. Победы, 56,
(044) 456-42-48,
tems@ukr.net



Милько
Ромэн Эдуардович,
канд. техн. наук,
директор НИЦ
«ООО «Электропривод»,
г. Киев - 127, ул. полк. По-
техина, 8(044) 258-38-71



Доманский
Григорий Викторович,
аспирант Ин-та эл.
динамики НАН Украины,
03680 г. Киев -57,
пр. Победы, 56,
(044) 456-42-48,
tems@ukr.net