

УДК 621.313.13

В.Ф. Стрелков, М.В. Андрюхин**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ
ВРАЩЕНИЯ АНТЕННЫ РЛС**Федеральный научно-производственный центр
«Научно-исследовательский институт радиотехники»

Современное направление развития радиолокационных станций (РЛС) связано с использованием переменной скорости вращения антенны. При этом актуальной является разработка систем управления режимами работы регулируемых электроприводов (РЭП) в составе таких комплексов. В статье описывается предложенная авторами система управления электродвигателем вращения антенны РЛС, которая обеспечивает высокую эффективность работы РЭП в стационарном и нестационарном режимах. Предложенная система управления позволяет сохранить характеристики направленности в секторе сканирования и тем самым позволяет повысить тактико-техническую характеристику РЛС. Представлена имитационная модель электротехнического комплекса, разработанная на основе структурной схемы предложенной системы управления. С помощью имитационной модели установлена взаимосвязь между переменной составляющей мощности, потребляемой электродвигателем при ветровой нагрузке, и скоростью вращения его вала в стационарном режиме работы РЭП.

Ключевые слова: математическая модель, регулируемый электропривод, структура схемы управления электродвигателем, электромагнитные процессы.

1. Введение

Современные радиолокационные станции (РЛС) все чаще проектируются с активными фазированными антенными решетками (АФАР), обеспечивающими электрическое горизонтальное и вертикальное сканирование диаграммы направленности антенны (ДНА) [1-4].

Применение РЛС с переменной скоростью вращения антенны позволяет повысить ее тактико-технические характеристики и технико-экономические показатели электропривода [5, 6]. Актуальной является задача исследования нестационарных процессов в электротехнических комплексах (ЭТК) с переменной скоростью вращения антенны.

Особенностью современных РЛС является то, что в её автономной системе электроснабжения одной из самых мощных нагрузок является регулируемый электропривод (РЭП) вращения антенны. Его потребляемая мощность составляет 20-25% от мощности дизель-генератора.

Известно несколько систем управления РЭП вращения антенн РЛС [7-9]. РЛС является автономным объектом с первичным источником питания – генератором ограниченной мощности. В связи с этим, крайне важно найти рациональный вариант управления режимами работы РЭП, от качественной работы которого зависит эффективность работы всей РЛС.

II. Материалы и методы

В современном ЭТК РЛС выделяются две группы систем. Первая из них состоит из системы автономного электроснабжения (САЭС), системы вращения антенны (СВА), системы импульсного питания (СИП). Для нее характерно изменение параметров потребления (генерирования) электрической энергии, как в стационарном режиме, так и нестационарном режиме при изменении ветровой нагрузки и режимов работы РЛС. Вторая группа, включающая в себя систему вторичного электропитания (СВЭ), систему бесперебойного питания, систему обеспечения тепловых режимов (СОТР), в первом приближении может рассматриваться как постоянная нагрузка (ПН) с неизменной потребляемой мощностью.

Предложена система управления электродвигателем вращения антенны РЛС (рис. 1), обеспечивающая эффективную работу РЭП как в стационарном, так и в нестационарном режимах работы [10]. Нестационарный режим работы наблюдается при резком возрастании нагрузки на валу антенны, что может произойти при мощном порыве ветра.

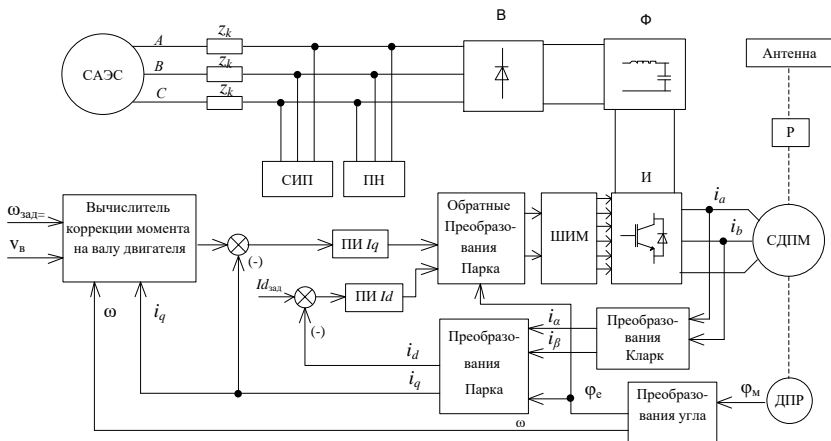


Рис. 1. Структурная схема ЭТК с переменной скоростью вращения антенны

СВА включает в себя регулируемый электропривод (РЭП), редуктор (Р) и антенну. В состав РЭП входят: синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), выпрямитель (В), фильтр (Ф), инвертор (И), датчик

положения ротора (ДПР), система управления, построенная в синхронно-вращающейся системе координат с подчиненным регулированием параметров, содержащая в себе широтно-импульсный модулятор ШИМ, блоки пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов в контурах токов I_d , I_q и блоки преобразования координат.

Мощность, потребляемая СИП, представляющей собой импульсную нагрузку [11], также величина переменная, зависящая от режимов работы РЛС. Функцию САЭС может выполнять либо трансформатор подстанции, питающийся от общепромышленной сети, либо синхронный генератор дизель-электростанции.

Традиционно СВА обеспечивает постоянную скорость вращения антенны, что, в свою очередь, при ветровой нагрузке, воздействующей на полотно антенны, вызывает появление переменной составляющей момента на валу электродвигателя и потребляемой им мощности [6]. Это ведет к увеличению эквивалентного (среднеквадратичного) момента на валу электродвигателя его расчетной мощности, массы, габаритов и стоимости. Кроме того, неравномерный характер потребления электрической энергии вызывает колебания напряжения питания СВА, снижая электромагнитную совместимость (ЭМС) РЭП и надежность работы всей РЛС. Определенного улучшения указанных показателей можно достичь при переменной скорости вращения вала СДПМ и антенного полотна.

В результате выполненных авторами исследований определена взаимосвязь между переменной составляющей мощности, потребляемой электродвигателем при ветровой нагрузке, и скоростью вращения его вала в стационарном режиме работы РЭП [12]. Установлено, что работа РЭП АФАР с относительно небольшим коэффициентом пульсаций скорости вращения антенны $\delta\omega^*$, допускаемым техническим регламентом эксплуатации РЛС, позволяет в 2,25 раза снизить коэффициент пульсаций потребляемой им мощности δP^* и на 26% уменьшить требуемую величину номинальной мощности электродвигателя РЭП.

Уменьшение пульсаций потребляемой мощности повышает ЭМС РЭП за счет снижения колебаний напряжения в сети ЭТК, что увеличивает надежность (функциональную) и, кроме того, снижает расчетную мощность его силовой полупроводниковой части. Уменьшение номинальной мощности электродвигателя РЭП позволяет снизить его стоимость, массу и габариты и при той же величине нагрузки повысить КПД.

Дальнейшего улучшения характеристик РЭП можно достичь путем еще большего увеличения коэффициента пульсаций $\delta\omega^*$, однако, это приводит к ухудшению тактико-технических характеристик РЛС.

III. Имитационная модель

Предложен способ и устройство управления РЭП антенны РЛС, реализующие в условиях ветровой нагрузки электромеханическое сканирование с постоянной скоростью вращения ДНА [12], что обеспечивает сохранение характеристик направленности в секторе сканирования.

Для этого величину коэффициента пульсаций скорости вращения вала СДПМ и антенны $\delta\omega^*$ поддерживают на уровне, при котором коэффициент пульсаций мощности $\delta P^* \approx 0$, для чего в систему управления РЭП введен вычислитель коррекции момента на валу СДПМ. Вычислитель формирует сигнал, воздействующий на инвертор РЭП, который пропорционален переменной составляющей момента СДПМ и находится в противофазе с сигналом, пропорциональным переменной составляющей момента сопротивления на его валу. Одновременно формируется сигнал, подаваемый на устройство управления, реализующие электронное сканирование ДНА с переменной скоростью в противофазе с изменением скорости вращения АФАР.

Для выявления особенностей работы ЭТК в нестационарных режимах работы и установления базовых соотношений для расчета его параметров при совмещенном сканировании, выполнено исследование электромагнитных процессов в нем при переменной скорости вращения вала СДПМ.

С учетом сложной зависимости момента сопротивления на валу СДПМ от скорости ветра, скорости вращения антенны и ее геометрии, а также принимая во внимание высокий порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих работу ЭТК, в качестве математического аппарата был выбран численный метод расчета с использованием имитационных моделей пакета Matlab Simulink.

Имитационная модель построена в соответствии с ее функциональной схемой, приведенной на рис. 1. Блоки прямого и обратного преобразования Парка, преобразования Кларк, ШИМ и другие реализованы стандартными элементами библиотеки пакета Simulink. Структурная схема вычислителя коррекции момента на валу СДПМ дана на рис. 2.

Коэффициенты пульсаций скорости вала $\delta\omega^*$ и пульсаций мощности δP^* в стационарном режиме работы рассчитываются, в общем случае, по формуле коэффициента пульсаций сложной периодической функции $f(t)$ [13]:

$$\delta F^* = \frac{\sqrt{F_{RMS}^2 - F_{MEAN}^2}}{F_{MEAN}}, \quad (1)$$

где F_{RMS} , F_{MEAN} – соответственно, среднеквадратичное и среднее на периоде повторяемости, значения периодической функции $f(t)$.

Максимальный допустимый угол Θ_{\max} электрического сканирования РЛС равен $\Theta_{\max} = 45^\circ$. Требуемый угол электрического сканирования ДНА в горизонтальной плоскости определяется по формуле:

$$\Theta_s = \gamma_{\sim} - \gamma_{=}, \quad (2)$$

где $\gamma_{=}$, γ_{\sim} – углы механического сканирования ДНА при постоянной и переменной скорости вращения антенны, соответственно.

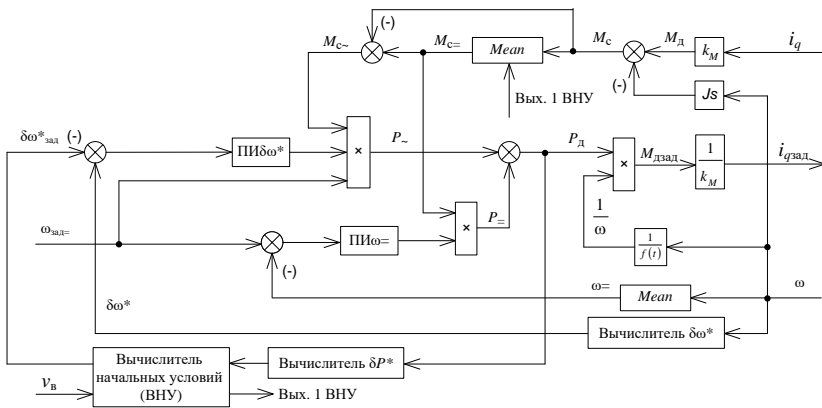
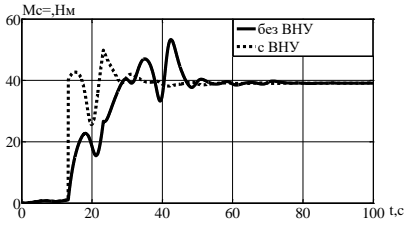


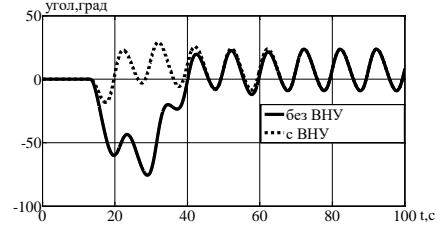
Рис. 2. Структурная схема вычислителя коррекции момента

IV. Результаты

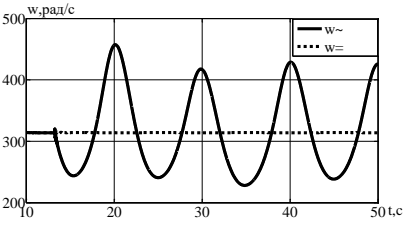
Моделирование электромагнитных процессов выполнено при следующих параметрах РЭП и сети: $\Omega_{зад} = 6 \text{ мин}^{-1}$ ($\Omega_{зад} = 0,63 \text{ рад/с}$); $J = 1,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $i = 500$; $R_k = 0,121 \text{ Ом}$; $X_k = 6,75 \text{ мОм}$. В качестве САЭС использован трансформатор мощностью 75 кВА. Учитывалось также, что момент сопротивления зависит от скоростей ветра и вращения антенны и при $V = 15 \text{ м/с}$, $\Omega_{зад} = 6 \text{ мин}^{-1}$ значения постоянной и переменной составляющей момента сопротивления равны $M_{с=} = 40 \text{ Нм}$, $M_{с\sim} = 50 \text{ Нм}$, соответственно. Максимальный допустимый угол Θ_{\max} электрического сканирования равен $\Theta_{\max} = 45^\circ$. На рис. 3 в - з представлены полученные диаграммы.



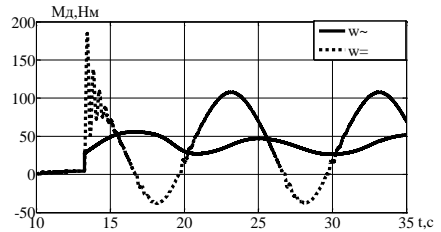
а.



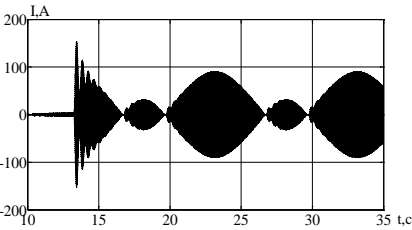
б.



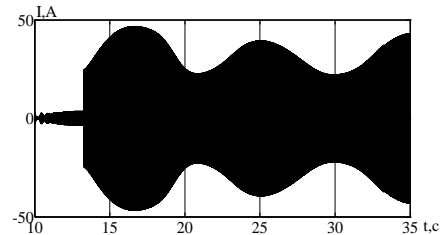
в.



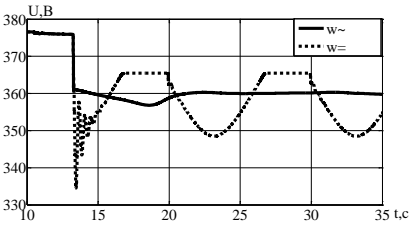
г.



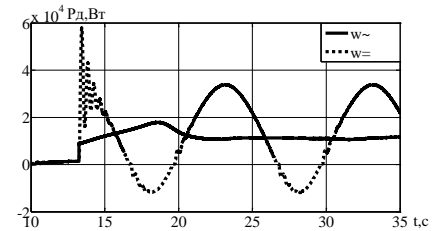
д.



е.



ж.



з.

Рис. 3. Временные диаграммы работы ЭТК

- а – среднее значение момента сопротивления; б – угол электронного сканирования Θ_s ; в, г – скорость вращения вала и момент на СДПМ;
 д, е – ток в фазе СДПМ при постоянной и переменной скорости вращения;
 ж – действующее значение напряжения сети; з – мощность на валу СДПМ

Представленные на рис. 3 временные диаграммы, получены в процессе имитационного моделирования для нестационарного режима работы ЭТК мощности, потребляемой СИП с 0 до 20 кВт, и одновременном возрастании скорости ветра V с 0,5 до 15 м/с и дальнейшем переходе ЭТК в стационарный режим работы РЭП.

Для обеспечения постоянной скорости сканирования ДНА сигнал, пропорциональный требуемому углу электрического сканирования Θ_z (рис. 3, б), подается на управляющие устройства диаграммообразующей системы. При этом величина Θ_z не должна превышать значение Θ_{\max} электрического сканирования ДНА, обеспечиваемого РЛС.

Из сопоставления приведенных результатов следует, что при указанных параметрах РЭП работа РЛС с совмещенным сканированием ДНА в условиях контролируемой пульсации скорости вращения ее антенны устраняется генераторный режим работы РЭП, (рис. 3, г, д, е). Коэффициент пульсаций скорости вращения антенны при скорости ветра 15 м/с не превышает 22% (рис. 3, в). Помимо этого, уменьшаются:

- в 1,6 раза (с 64 Нм до 40 Нм) пульсации момента на валу СДПМ в стационарном режиме и в 6 раз (с 180 Нм до 30 Нм) в нестационарном режиме (рис. 3, г);
- в 1,9 раза (с $I_m = 90$ А до $I_m = 47$ А) амплитуда тока фазы СДПМ в стационарном режиме и в 6 раз (с $I_m = 150$ А до $I_m = 25$ А) в нестационарном (рис. 3, д, е);
- более чем в 10 раз (с 17 В до 1,5 В) колебания напряжения питающей сети в стационарном режиме и в 2,25 раза (с 45 В до 20 В) провал напряжения в нестационарном (рис. 3, ж);
- в 1,7 раза (с 20 кВт до 12 кВт) мощность на валу СДПМ в стационарном режиме и в 6 раз (с 60 кВт до 10 кВт) в нестационарном режиме (рис. 3, з).

В результате исследований установлено, что вычислитель коррекции момента обрабатывает возникшее изменение режима работы примерно за 2-3 оборота антенны (рис. 3 а, б). Это связано с относительно длительным вычислением величины среднего значения $M_{с=}$. При этом угол Θ_z превышает максимально допустимое значение Θ_{\max} (рис. 3, б). В итоге, электрическое сканирование не обеспечивает требуемую ориентацию ДНА, и на протяжении 2-3-х оборотов антенны РЛС не в состоянии обеспечить обнаружение и сопровождение целей, находящихся в зоне ее действия.

Данный недостаток устраняется за счет запоминания установившихся значений $M_{с=}$ при различных скоростях V ветра в ячейке памяти вычислителя начальных условий (ВНУ). Также в ВНУ вводятся заранее определенные величины коэффициента пульсаций скорости $\delta\omega^*$, соответствующие различным скоростям ветра, при которых $\delta P^* \approx 0$ [13].

Значения $M_{с=}$ и $\delta\omega^*$ определяются по результатам моделирования. Зависимости данных величин от скорости ветра при указанных выше параметрах ЭТК приведены на рис. 3 (а, в).

При резком изменении скорости ветра ВНУ задает как необходимый коэффициент пульсаций скорости $\delta\omega^*$, так и необходимое начальное значение $M_{с=}$ (рис. 4, а), что позволяет в нестационарном режиме работы обеспечить значения угла Θ , практически не превышающие его величину в стационарном режиме (рис. 4, б). За счет этого РЛС осуществляет непрерывное обнаружение и сопровождение целей.

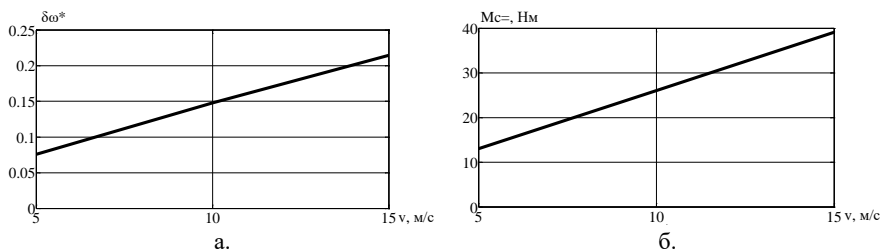


Рис. 5. Зависимости коэффициента пульсаций скорости $\delta\omega^*$ (а) и среднего значения момента сопротивления $M_{с=}$ (б) от скорости ветра

V. Заключение

По результатам исследования можно заключить, что реализация предложенного способа управления с переменной скоростью вращения СДПМ ведет к улучшению технико-экономических показателей РЭП: уменьшению номинальной мощности СДПМ и инвертора, уменьшению стоимости, массы, габаритов, повышению КПД и надежности, а также улучшению его электромагнитной совместимости.

Помимо этого, при достаточной механической прочности АФАР исключается необходимость перехода на пониженные скорости вращения антенны при увеличении ветровой нагрузки, что улучшает тактико-технические характеристики РЛС: скорость обзора, точность определения координат цели, надежность сопровождения высокоскоростных целей.

© Стрелков В.Ф., 2018
© Андрюхин М.В., 2018

Библиографический список

- [1] Воскресенский Д.И., Канащенков А.И. Активные фазированные антенные решетки. М: Радиотехника, 2004. – 488 с.
- [2] Бахрах Л.Д. Антенны с электрическим сканированием. М.: Введение в теорию.

2001. – 250 с.
- [3] Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. М.: Радио и связь, 1986. – 446 с.
- [4] Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
- [5] Казаринова Ю.М. Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
- [6] Хватов С.В., Стрелков В.Ф., Тетенькин Л.В. Оптимизация режимов работы электроприводов вращения антенно-мачтовых устройств РЛС // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 3. Ч. 3. С. 186-190.
- [7] Казаринова Ю.М. Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.
- [8] Стрелков В.Ф., Ваняев В.В., Андриюхин М.В., Бобылев И.В. Способ и система управления электродвигателем вращения антенны РЛС, Пат. РФ 2554107, опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.
- [9] Стрелков В.Ф., Андриюхин М В, Ваняев В.В. Электропривод вращения антенны РЛС с переменной скоростью // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 3. С. 78-84.
- [10] Положительное решение по заявке № 2018108333 / Система управления электродвигателем вращения антенны РЛС, 2018.
- [11] Хватов С.В., Стрелков В.Ф., Тетенькин Л.В. Вентильно-машинные системы радиолокационных станций // Приводная техника. 2010. № 3. С. 19-21.
- [12] Андриюхин М.В., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В. Имитационная модель электропривода вращения антенны РЛС // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, Том. 2, Саранск, 2014. С. 386-389.
- [13] Андриюхин М.В., Стрелков В.Ф., Андриюхин М.В., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В., Титов В.Г. Нестационарные режимы работы вентильно-машинного комплекса РЛС. Известия вузов // Электромеханика. 2016. № 1 (543). С. 56-61.

V. F. Strelkov, M.V. Andruhin

CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE FOR RADAR STATION ANTENNA

Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering (NNIIRT),
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The modern direction of development of radar stations is associated with the use of variable speed antenna. At the same time, the development of control systems for the operation modes of adjustable electric drives (AED) as part of such complexes is of current importance. The article describes the proposed control system for the rotation motor of the radar antenna, which ensures high efficiency of the operation of the AED in stationary and non-stationary modes. The proposed control system allows one to

save the directivity in the scanning sector and thereby allows to improve the tactical and technical characteristics of the radar. A simulation model of the electrical complex, developed on the basis of the block diagram of the proposed control system, is presented. The relationship between the variable component of the power consumed by the electric motor under wind load and the speed of rotation of its shaft in the stationary mode of AED operation is established with the help of a simulation model.

Keywords: adjustable electric drives, electric motor control circuit structure, electromagnetic processes, mathematical model.

References

- [1] D.I. Voskresensky and A.I. Kanaschenkov, Active phased antenna arrays. Moscow: Radio Engineering, 2004.
- [2] L.D. Bakhrah, Antennas with electrical scanning. Moscow: Introduction to the theory, 2001.
- [3] R.A. Monzingo and T.W. Miller, Adaptive antenna arrays. Moscow: Radio and communication, 1986.
- [4] D.I. Voskresensky, Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays. Moscow: Radio engineering, 2012.
- [5] Yu.M. Kazarinova, Radio systems. Moscow: Higher School, 1990.
- [6] S.V. Khvatov, V.F. Strelkov and L.V. Tetenkin. Optimization of the operating modes of the electric rotation of the antenna-mast radar devices // Izvestiya Tula State University, vol. 3, pp. 186-190, 2010.
- [7] Yu.M. Kazarinova, Radio systems. Moscow: Higher School, 1990.
- [8] V.F. Strelkov, V.V. Vanyaev, M.V. Andryukhin and I.V. Bobylev. The method and system of control of the motor of rotation of the radar antenna // R.F. Patent 2554107, June 27, 2015.
- [9] V.F. Strelkov, M.V. Andryukhin and V.V. Vanyaev. The electric drive of the rotation of the radar antenna with variable speed // Bulletin of the Concern air defense «Almaz-Antey», vol. 3, pp.78-84, 2015.
- [10] Positive decision on application 2018108333 / Radar antenna rotation control system, 2018.
- [11] S.V. Khvatov, V.F. Strelkov and L.V. Tetenkin. Ventilatory-machine systems of radar stations // Drive technology, no. 3, pp. 19-21, 2010.
- [12] M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov and V.V. Vanyaev. Simulation model of the electric drive of the radar antenna rotation // Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) conference on the automated electric drive, vol. 2, Saransk, pp. 386-389, 2014.
- [13] M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov, M.V. Andryukhin, V.F. Strelkov, V.V. Vanyaev and V.G. Titov. Non-stationary modes of operation of a valve-engine radar complex // News of high schools. Electromechanics, vol. 1, no. 543, pp. 56-61, 2016.