

## Исследование вентильно-машинного комплекса РЛС при постоянной скорости вращения антенны

В.Ф. Стрелков<sup>1</sup>, М.В. Андриухин<sup>2</sup>, В.В. Ваняев<sup>2</sup>, В.Г. Титов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО ФНПЦ «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: STO@nniirt.ru, epa@nntu.nnov.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** В настоящее время недостаточно исследован вентильно-машинный комплекс РЛС, который включает в себя системы первичного электропитания, вращения антенны, импульсного питания передающих модулей, вторичного электропитания аппаратуры, обеспечения тепловых режимов, бесперебойного питания. Совместное функционирование перечисленных систем в составе вентильно-машинного комплекса характеризуется их взаимовлиянием, что делает актуальной задачу анализа электромагнитных процессов в вентильно-машинном комплексе в стационарных и нестационарных режимах, конечной целью которого является совершенствование методов управления этими системами для повышения их технико-экономических показателей.

**Материалы и методы:** Имитационная модель вентильно-машинного комплекса создана в программном пакете MATLAB Simulink. Имитационная модель представляет собой набор элементов, взятых из библиотеки SimPowerSystems, и вновь разработанных блоков, реализующих математические зависимости упруго-вязких связей и ветровой нагрузки.

**Результаты:** В результате исследования вентильно-машинного комплекса установлено, что при большой ветровой нагрузке имеет место генераторный режим работы двигателя, а также наблюдается токовая перегрузка СДПМ и инвертора в пределах от 30 до 120 % от номинальных значений в стационарном и нестационарном режимах соответственно. При этом при питании от сети общего назначения снижение напряжения питающей сети достигает 22 % от номинальной величины. При питании от дизель-генератора с быстродействующей обратной связью по напряжению снижение напряжения питающей сети не превышает 5 %.

**Выводы:** Применение вентильно-машинного комплекса с электроснабжением на базе дизель-генератора в условиях значительной ветровой нагрузки позволяет повысить уровень электромагнитной совместимости (ЭМС) его систем за счет поддержания напряжения сети в допустимых пределах и обеспечить при постоянной скорости вращения антенны надежную работу РЛС с наибольшей скоростью обзора.

**Ключевые слова:** вентильно-машинный комплекс, радиолокационная станция, электропривод, упруго-вязкие связи, ветровая нагрузка, имитационная модель.

## Research into valve-machine complex of radar stations at constant antenna rotation speed

V.F. Strelkov<sup>1</sup>, M.V. Andryukhin<sup>2</sup>, V.V. Vanyaev<sup>2</sup>, V.G. Titov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal Research and Production Centre «Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering»  
Joint-Stock Company, Nizhny Novgorod, Russian Federation

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseyev, Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: STO@nniirt.ru, epa@nntu.nnov.ru

### Abstract

**Background:** The valve-machine complex (VMC) of radar stations is studied insufficiently. VMC consists of a primary power supply system, a system of antenna rotation, a transmitting module pulse supply system, a system of equipment secondary power supply, a thermal control system, an uninterruptible power supply system. Joint operation of these systems as part of VMC is characterized by their mutual influence, which makes it urgent to analyse electromagnetic processes in the VMC in stationary and non-stationary modes. The ultimate goal of such analysis is to improve the management of these systems in order to achieve better technical and economic parameters.

**Materials and methods:** The VMC simulation model was made in the MATLAB Simulink software package. The simulation model is a set of elements taken from the SimPowerSystems library and newly developed units that implement mathematical dependences of viscoelastic couplings and wind load.

**Results:** The study has revealed that at high wind loads, the motor works in the generator mode and the permanent magnet synchronous motor and inverter work in overcurrent conditions with a 30 – 120 % deviation from the nominal values in the stationary and non-stationary modes, respectively. At the same time the voltage supply reduction reaches 22 % of the nominal value when the complex is powered by a general-purpose network. However, when it is powered by a diesel generator with a high-speed voltage feedback, the voltage supply reduction does not exceed 5 %.

**Conclusions:** The use of VMC powered by a diesel generator under conditions of significant wind loads can increase the level of electromagnetic compatibility of its systems by maintaining the voltage within acceptable limits and ensure reliable operation of the radar with the highest rate of review at a constant speed of antenna rotation.

**Key words:** valve-machine complex, radar station, electric drive, viscoelastic couplings, wind load, simulation model.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2016.3.068-072

Радиолокационные станции (РЛС) применяются для обнаружения и измерения координат всех целей в данной области пространства или земной поверхности [1], а также для управления средствами воздушно-космической обороны и представляют собой сочетание сложных радиоэлектронных и электромеханических компонентов.

Одним из базовых компонентов РЛС является вентильно-машинный комплекс (ВМК), который в значительной мере определяет технико-экономические показатели и функциональные возможности РЛС при ее применении, в том числе военном, применении.

ВМК включает в себя следующие системы:

- первичного электропитания (СПЭ);
- вращения антенны (СВА);
- импульсного питания (СИП) передающих модулей (ПМ);
- вторичного электропитания аппаратуры (СВЭ);
- обеспечения тепловых режимов (СОТР);
- бесперебойного питания (СБП).

ВМК может работать в стационарном режиме при постоянной ветровой нагрузке, скорости вращения антенны и неизменном среднем значении мощности, потребляемой СИП, а также в нестационарном режиме при резком изменении скорости ветра или параметров работы СИП.

Совместное функционирование перечисленных систем в составе ВМК характеризуется их взаимовлиянием, что делает актуальной задачу анализа электромагнитных процессов в ВМК в стационарных и нестационарных режимах, конечной целью которого является совершенствование методов управления этими системами для повышения их технико-экономических показателей.

В [2] рассмотрен ряд вопросов, связанных с технической реализацией электропривода (ЭП) вращения антенны РЛС на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ)<sup>1</sup>. В [3, 4] затрагиваются технико-экономические показатели ЭП вращения антенны РЛС в составе ВМК.

Вместе с тем к настоящему времени остается недостаточно исследованным целый ряд вопросов:

- влияние ветровой нагрузки на режимы работы систем ВМК, в том числе генераторный режим работы ЭП СВА;

– влияние упруго-вязких связей и люфта в ЭП на его работу и на работу ВМК;

– процессы, происходящие при одновременном увеличении ветровой нагрузки на ЭП с упруго-вязкими связями и изменении режима работы СИП.

В эквивалентной функциональной схеме ВМК (рис. 1) можно выделить две группы систем. Для первой из них (СПЭ, СВА, СИП) характерно изменение параметров потребления (генерирования) электрической энергии как в стационарном режиме, так и в нестационарном при изменении ветровой нагрузки и режимов работы РЛС. Вторая группа, включающая в себя СВЭ, СБП и СОТР, в первом приближении, может рассматриваться как постоянная нагрузка (ПН) с неизменной потребляемой мощностью.

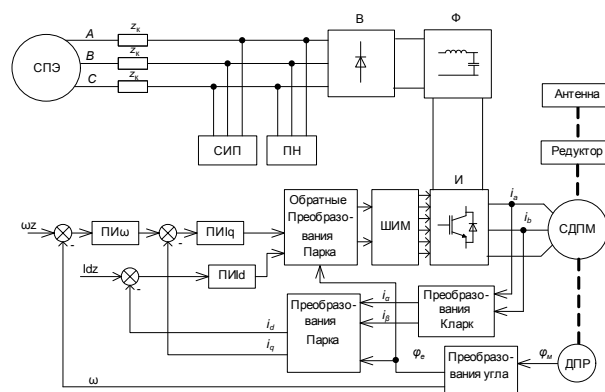


Рис. 1. Эквивалентная функциональная схема ВМК: В – выпрямитель; Ф – фильтр; И – инвертор; ДПР – датчик положения ротора; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ПИ $\omega$ , ПИ $I_d$ , ПИ $I_q$  – ПИ-регуляторы в контурах угловой скорости  $\omega$  и токов  $I_d$  и  $I_q$ ;  $z_k$  – сопротивление фазы соединительного кабеля

СВА является переменной нагрузкой, так как момент сопротивления на валу электродвигателя СВА изменяется в течение оборота антенны и зависит от скорости ветра, скорости вращения антенны и от ее конфигурации [3]. Мощность, потребляемая СИП, представляющая собой импульсную нагрузку [4], также является величиной переменной, зависящей от режимов работы РЛС. Функцию СПЭ может выполнять либо трансформатор подстанции, питающийся от общепромышленной сети, либо синхронный генератор дизель-электростанции.

СВА включает в себя ЭП на базе СДПМ, в состав которого входит выпрямитель, фильтр, инвертор, датчик положения ротора и система управления, построенная в синхронно-вращающейся системе координат с подчиненным регулированием параметров, причем внутренним контуром является контур тока по оси  $q$ , а внешним – контур скорости. Для минимизации тока статора при требуемой вели-

<sup>1</sup> Васев Г.В. Алгоритмический метод повышения точности привода вращения и позиционирования антенны: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ковров, 2013. – 19 с.

чине момента нагрузки задание на ток по оси  $d$  приравнивают к нулю [5].

Аналитический расчет электромагнитных процессов в приведенной эквивалентной схеме (рис. 1) представляет собой достаточно сложную задачу из-за высокого порядка системы дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы.

В этих условиях представляется целесообразным применение численных методов расчета, например, с использованием имитационных моделей пакета *MATLAB Simulink*, обладающего широкими функциональными возможностями [6].

Для этого разработана имитационная модель ВМК (рис. 2), которая содержит СПЭ (SPE), соединительный кабель ( $z_k$ ), СИП (SIP), ПН (PN) и СВА, в которую входят: СДПМ (*Permanent Magnet Synchronous Machine*); система управления им (*System Control*), а также блоки ветровой нагрузки (*Wind Load*) и учета упруго-вязких связей и люфта (*uprugovaz*). Работа СИП имитируется нагрузкой *three-phase series RLC load*, коммутируемой прерывателем *Three-Phase Breaker*, а ПН – блоком *three-phase seriesRLCload*.

В отличие от модели, приведенной в [3], кроме блока учета упруго-вязких связей и люфта ЭП в предложенную модель введено устройство сброса энергии (УСЭ), которое представляет собой последовательно включенные транзистор и балластный резистор, подключенные параллельно конденсатору фильтра (на рис. 2 не показаны).

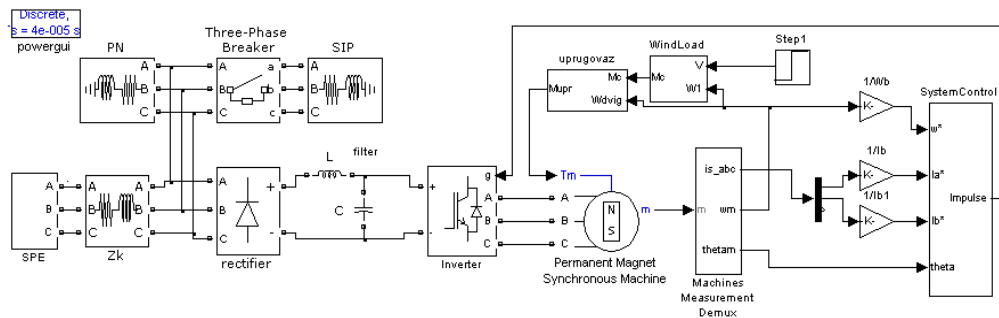


Рис. 2. Имитационная модель ВМК

Схема набора блока *uprugovaz*, реализующего математическую модель двухмассовой упруго-вязкой системы [7, с. 54], приведена на рис. 3.

На основе приведенной модели ВМК выполнены исследования ее стационарных и нестационарных режимов работы.

Стационарные режимы исследованы при наиболее характерных значениях электрических параметров и уровнях энергопотребления рассматриваемого комплекса. Так, мощности СИП, ЭП и ПН составляли 20 кВт, 20 кВт и 6 кВт соответственно.

В качестве СПЭ использован трансформатор мощностью 75 кВА, который осуществлял электропитание остальных систем комплекса по кабелю КРШС 4x16 длиной 100 м, активное и индуктивное сопротивление которого составляет соответственно  $R_k = 1,21 \text{ Ом/км}$  и  $X_k = 67,5 \text{ мОм/км}$ . Выбор трансформатора в качестве СПЭ обусловлен тем, что РЛС получает электропитание преимущественно от сети общего назначения, и только в случае отсутствия сети электропитание осуществляется от дизель-генератора, что объясняется значительно большей удельной стоимостью вырабатываемой им электроэнергии.

Исследования ВМК выполнены при различных режимах работы СИП, в том числе при экстремальных условиях, которым соответствует максимальная скорость вращения антенны, равная 6 об/мин, и скорость ветра 15 м/с, при которых наблюдается наиболее значительное воздействие ветровой нагрузки на ВМК.

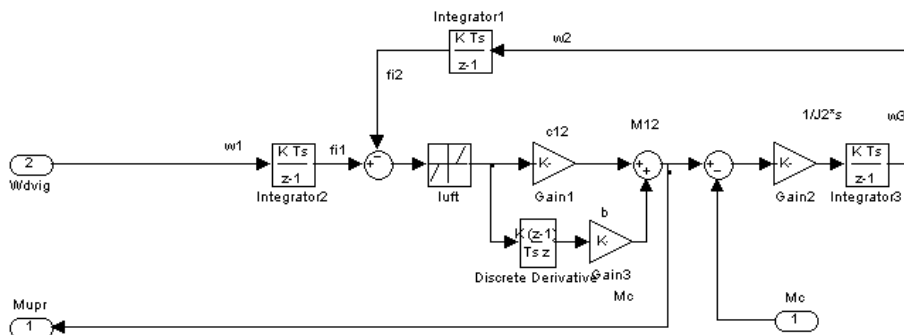


Рис. 3. Имитационная модель упруго-вязких связей с люфтом

Установлено, что при этих условиях в стационарном режиме развивается наибольший эквивалентный момент сопротивления на валу СДПМ, равный 64 Нм, которому соответствует эквивалентная мощность ЭП, равная 20 кВт. При этом мгновенное значение момента сопротивления на валу приводного двигателя изменяется в пределах от минус 38 Нм до 107 Нм.

В нестационарном режиме при изменении скорости ветра с 0,5 до 15 м/с из-за упруго-вязких связей ЭП происходит скачок момента до значения 186 Нм, что в 1,74 раза превышает максимальное значение момента в стационарном режиме.

В ходе выполнения имитационного моделирования получены временные зависимости электромагнитных процессов в ВМК, которые представлены на рис. 4, 5.

Анализ временной диаграммы фазного тока двигателя (рис. 4) показывает, что в стационарном режиме его амплитуда периодически изменяется в соответствии с колебаниями мгновенного значения момента сопротивления на валу СДПМ, обусловленными ветровой нагрузкой на полотно антенны. Это приводит к превышению токов СДПМ и инвертора, которое можно оценить по величине относительной токовой нагрузки  $\dot{I}$ , определяемой по формуле  $\dot{I} = I_m / I_{\text{нном}}$ , где  $I_m$ ,  $I_{\text{нном}}$  – текущее и номинальное амплитудные значения тока фазы СДПМ соответственно. В этом режиме амплитуда тока достигает значения  $I_m = 90$  А, при номинальном его значении  $I_{\text{нном}} = 68$  А. Таким образом, относительная токовая нагрузка СДПМ и инвертора в стационарном режиме составляет  $\dot{I} = 1,3$ .

Такая же ситуация имеет место и в нестационарном режиме, когда при резком увеличении скорости ветра из-за упруго-вязких связей и люфта ЭП происходит бросок амплитуды фазного тока СДПМ. Так, например, в момент возрастания скорости ветра с 0,5 до 15 м/с происходит скачок амплитуды тока до максимального значения  $I_m^{\text{max}} = 150$  А, чему соответствует относительное значение токовой нагрузки, достигающее величины  $\dot{I} = 2,2$ . Такой скачок тока вызывает срабатывание токовой защиты СДПМ и нарушение штатного режима работы РЛС.

СДПМ при значительной ветровой нагрузке (рис. 4) в одной части периода  $T$  вращения антенны работает в двигательном режиме, а в другой – в генераторном режиме, при котором энергия, выводимая с вала машины, накапливается в электрическом поле конденсатора фильтра  $\Phi$  (рис. 1), вызывая увеличение его напряжения. Для ограничения напряжения конденсатора фильтра на допустимом уровне при отсутствии возможности рекуперации этой энергии в сеть ВМК должен иметь УСЭ с балластным резистором.

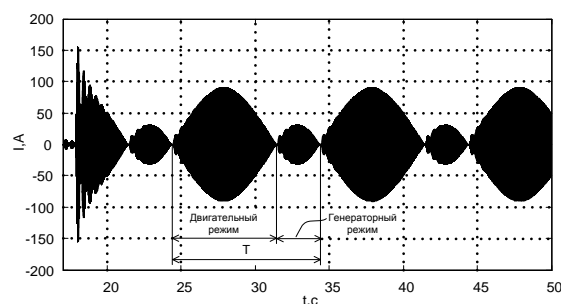


Рис. 4. Диаграмма фазного тока двигателя ЭП

На рис. 5 представлены зависимости действующего значения линейного напряжения ВМК от времени в нестационарном режиме работы РЛС, начинающемся при  $t \approx 18$  с, в результате одновременного увеличения мощности, потребляемой СИП, с 0 до 20 кВт и скорости ветра с 0,5 до 15 м/с.

Анализ диаграмм (рис. 5) показывает, что в указанный момент времени действующее значение напряжения уменьшается до 334 В за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении трансформатора и сопротивлении питающего кабеля, что составляет больше 10 % от номинального значения. Если учесть, что в реальных сетях общего назначения действующее значение напряжения, согласно действующему стандарту (ГОСТ Р 54149-2010), имеет допустимое отклонение в пределах  $\pm 10$  % от номинального уровня, то суммарное снижение в нестационарном режиме может достичь 22 %. Такое снижение вызывает срабатывание защиты от пониженного напряжения и нарушение работы РЛС.

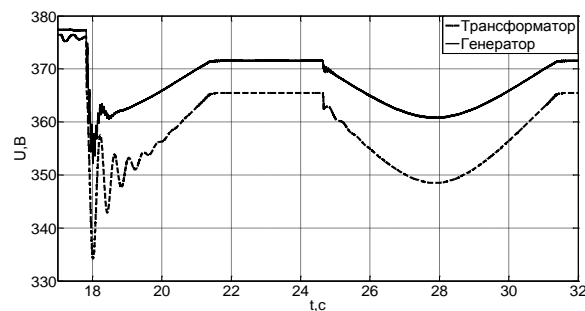


Рис. 5. Диаграммы действующего значения напряжения сети ВМК

Следует заметить, что на интервалах генераторного режима СДПМ в стационарном режиме работы ЭП потребляемый ток равен нулю и снижения напряжения в сети ВМК не происходит (рис. 5, плоские участки кривых).

Для уменьшения токовой перегрузки СДПМ и инвертора, а также провала напряжения в сети ВМК при увеличении ветровой нагрузки необходимо переходить на пониженную скорость вращения вала СДПМ и, следовательно, антенны. При этом колебания тока, потребляемого СДПМ, уменьшаются, электромагнитная совместимость систем ВМК повышается, однако снижается скорость обзора РЛС.

При использовании в СПЭ дизель-генератора с синхронным генератором БГ-100 мощностью 100 кВт, имеющим обратную связь по напряжению, падение напряжения на его внутреннем сопротивлении при увеличении тока нагрузки компенсируется. За счет этого при тех же условиях возникновения и параметрах нестационарного режима суммарное снижение среднеквадратичного значения напряжения не превышает 5 % его номинальной величины (рис. 5), что увеличивает электромагнитную совместимость систем ВМК и надежность за счет исключения срабатывания защиты и возможных перерывов в работе РЛС при снижении напряжения.

Таким образом, ВМК с СПЭ на базе дизель-генератора, обладая повышенным уровнем электромагнитной совместимости, может обеспечить работу РЛС с наибольшей скоростью обзора в условиях максимальной ветровой нагрузки.

#### Список литературы

1. **Радиотехнические системы** / под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.
2. **Магнитоэлектрические** вентильные двигатели производства ЗАО «ЧЭАЗ» / А.А. Афанасьев, В.А. Нестерин, В.М. Никитин, Р.А. Романов // Вестник Чувашского университета. Т. 3. Естественные и технические науки. – 2010. – С. 187–194.
3. **Андрюхин М.В., Стрелков В.Ф., Ваняев В.В.** Имитационная модель электропривода вращения антенны РЛС // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. Т. 2. – Саранск, 2014. – С. 386–389.
4. **Хватов С.В., Стрелков В.Ф., Тетенькин Л.В.** Вентильно-машинные системы радиолокационных станций // Приводная техника. – 2010. – № 3. – С. 19–21.

*Стрелков Владимир Федорович,*

Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
e-mail: STO@nniirt.ru

*Андрюхин Максим Владимирович,*

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева,  
аспирант кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики,  
e-mail: farand89@gmail.com

*Ваняев Валерий Владимирович,*

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования, электропривода и автоматики,  
e-mail: epa@nntu.nnov.ru

*Титов Владимир Георгиевич,*

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева,  
доктор технических наук, профессор, зам. зав. кафедрой электрооборудования, электропривода и автоматики,  
e-mail: epa@nntu.nnov.ru

5. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008. – 298 с.

6. **Дьяконов В.П.** MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 v. Основы применения: Полное руководство пользователя. – М.: Солон-Р, 2002.

7. **Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г.** Автоматизированный электропривод с упругими связями. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

#### References

1. Kazarinov, Yu.M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [The radio systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1990. 496 p.
2. Afanas'ev, A.A., Nesterin, V.A., Nikitin, V.M., Romanov, R.A. Magnitoelektricheskie ventil'nye dvigateli proizvodstva ZAO «ChEAZ» [Permanent-magnet AC Electronic Motors produced by JSC ChEAZ]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2010, vol. 3, pp. 187–194.
3. Andryukhin, M.V., Strelkov, V.F., Vanyaev, V.V. Imitatsionnaya model' elektroprivoda vrashcheniya anteny RLS [Simulation model of the radar antenna rotation electric drive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 v 2 t., t. 2* [Proceedings of the VIIIth international (XIXth All-Russian) conference on the automatic electric drive, vol. 2]. Saransk, 2014, pp. 386–389.
4. Khvatov, S.V., Strelkov, V.F., Teten'kin, L.V. Ventil'no-mashinnye sistemy radiolokatsionnykh stantsiy [Radar valve-machine system]. *Privodnaya tekhnika*, 2010, no. 3, pp. 19–21.
5. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector Control of AC Electric Drives]. Ivanovo, 2008. 298 p.
6. D'yakonov, V.P. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 v. Osnovy primeneniya: Polnoe rukovodstvo pol'zovatelya* [Foundations of Application: Complete User's Manual]. Moscow, Solon-R, 2002.
7. Bortsov, Yu.A., Sokolovsky, G.G. *Avtomatizirovannyy elektroprivod s uprugimi svyazyami* [Automated electric drive with elastic couplings]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat, 1992. 288 p.