

**В.С. ПЕТРУШИН**, д-р техн. наук, проф. ОНПУ;  
**А.М. ЯКИМЕЦ**, канд. техн. наук, доц. ОНПУ;  
**Р.Н. ЕНОКТАЕВ**, магистр ОНПУ

## МНОГОАСПЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗНЫХ ЗАКОНАХ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

**Введение.** Многообразие законов частотного управления, используемых в регулируемых электроприводах, предопределяет процедуру выбора определенного закона, что связано с характером, величиной и режимом работы нагрузки привода, а также требуемым диапазоном регулирования. Такой выбор возможен только после сопоставления эксплуатационных характеристик регулируемого асинхронного двигателя (РАД), полученных в результате многоаспектного моделирования. Во ряде научных трудов [1-4] рассматривались электроприводы с различными законами частотного управления.

**Постановка задачи.** Законы частотного управления при использовании преобразователей частоты – источников регулируемого по величине и частоте напряжения можно разделить на две группы. К первой группе относятся законы, связывающие величины и частоты питающего двигателя напряжения ( $U/f = \text{const}$ ,  $U/f^2 = \text{const}$ ,  $U/\sqrt{f} = \text{const}$  и др.). Ко второй – законы, обеспечивающие постоянство различных магнитных величин электрической машины: потока в воздушном зазоре  $\Phi_0$  и потокоцеплений статора  $\Psi_1$  и ротора  $\Psi_2$ . Для законов второй группы нахождение величин питающего двигателя напряжения, соответствующего определенной частоте питания обмотки и частоте вращения ротора, может быть выполнено по аналитическим зависимостям [5-8]. Для упрощения эти же значения напряжений используются и при решении системы нелинейных уравнений, описывающих динамические режимы. Для каждого закона частотного управления различными являются нелинейные коэффициенты уравнений (параметры схем замещения), потери в стали магнитопровода, добавочные и механические потери. Эти составляющие потерь, определенные для статических режимов, позволяют рассматривать энергетические показатели в переходных режимах [8-11]. При расчете динамических характеристик должен приниматься во внимание характер нагрузки. Только при «лифтовой» нагрузке момент на валу двигателя остается неизменным. При других характерах нагрузки следует учесть изменение момента на каждом шаге интегрирования системы уравнений. Вид динамических характеристик зависит также от момента инерции привода и скорости нарастания параметра регулирования – частоты преобразователя.

**Результаты исследований.** Для исследования эксплуатационных характеристик РАД в соответствии с принципами системного подхода обеспечивается совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и нагрузок [8], что реализовано в программном продукте DIMASDrive [12], разработанном на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета.

С целью ограничения исследований далее рассмотрен электропривод с транзисторным преобразователем частоты с автономным инвертором напряжения и ШИМ- регулированием. Приводным двигателем являлся серийный асинхронный двигатель 4A160S4 со схемой соединения обмотки статора «Y». Анализировались законы частотного управления, связывающие величины и частоты питающего двигателя напряжения ( $U/f = \text{const}$  и  $U/f^2 = \text{const}$ ), а также закон, обеспечивающий постоянство потокоцепления ротора ( $\Psi_2 = \text{const}$ ). При моделировании использовалась «вентиляторная» нагрузка, описываемая выражением  $M(n) = 0,5 + 10^{-5} \cdot n^2$ . Рассматривался диапазон регулирования от 200 до 2500 об/мин.

На рис.1 представлено изменение в диапазоне регулирования значений фазных напряжений двигателя при рассматриваемых законах.

Регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости изменения электрических, энергетических, тепловых, механических, виброакустических величин от числа оборотов, могут быть получены при использовании семейств характеристик, в том числе и механических, при различных параметрах регулирования, на которые накладываются характеристики нагрузочного механизма. На рис.2 представлено семейство механических характеристик и заданной нагрузки, соответствующие различным законам частотного регулирования.

Далее в статье приведены только характеристики, вид которых отличается для рассматриваемых законов частотного управления, что позволяет сравнивать эти законы.

© В.С. Петрушин, А.М. Якимец, Р.Н. Еноктаев, 2015

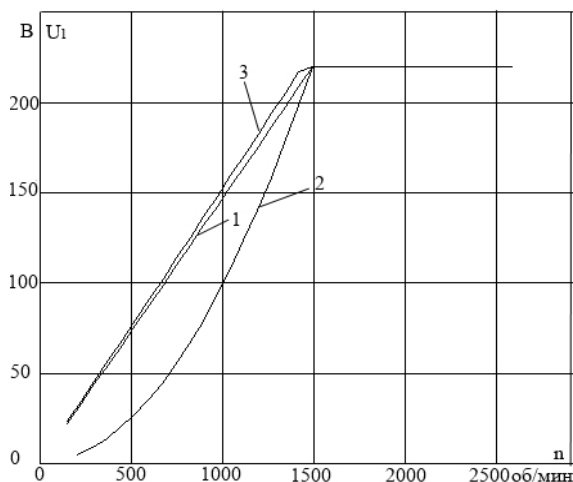


Рис.1 – Изменение фазных напряжений в диапазоне регулирования: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

При таком сочетании механических характеристик и нагрузки наблюдается двухзонность, которая проявляется на характере регулировочных характеристик.

В пределах каждой зоны имеет место однообразное изменение механических характеристик и характеристики загрузки.

На рис.3-6 представлены некоторые регулировочные характеристики РАД. Расчет виброакустических показателей (рис.7, 8) магнитного происхождения может быть выполнен по методике, Ю.А. Шумилова и В.Г. Герасимчука [13].

Динамические характеристики были рассмотрены для различных законов при работе на заданную тахограмму (2 с на 1000 об/мин, 1 с – 2000 об/мин) с учетом переходных процессов. Управление двигателем в динамических режимах при законе  $\Psi_2 = \text{const}$  – скалярное. Результаты моделирования частоты вращения, потребляемого тока и вращающего момента представлены на рис.9-11. На рис.15 представлены расчетные динамические зависимости виброскорости  $S_v = f(t)$  и магнитного шума  $S_n = f(t)$ , полученные для разных законов.

Методика расчета вентиляционного шума серийных асинхронных двигателей хорошо отработана и подтверждена экспериментальными данными [14]. В РАД частота вращения вентилятора изменяется в диапазоне регулирования, что обуславливает изменение аэродинамического шума. В динамических режимах (рис.14) вентиляционный шум нарастает пропорционально частоте вращения, достигая значений, соответствующих установившемуся режиму.

Известная методика расчета механических вибраций для обычных асинхронных короткозамкнутых двигателей [14] предназначена для жестких роторов, к которым относятся роторы АД единых серий. В динамических режимах механические вибрации нарастают пропорционально частоте вращения, достигая значений, соответствующих установившемуся режиму. Характеристики механических вибраций как в статических, так и в динамических режимах мало отличаются при различных законах частотного управления.

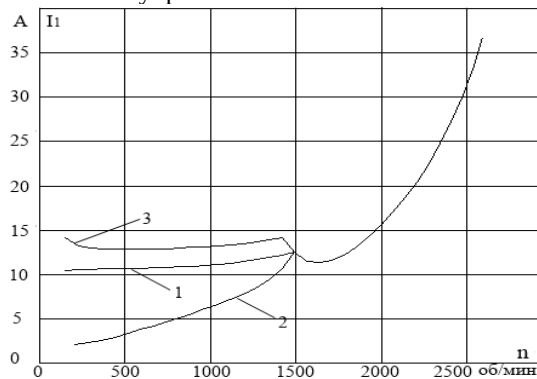


Рис.3 – Изменение потребляемых двигателем токов в диапазоне регулирования: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

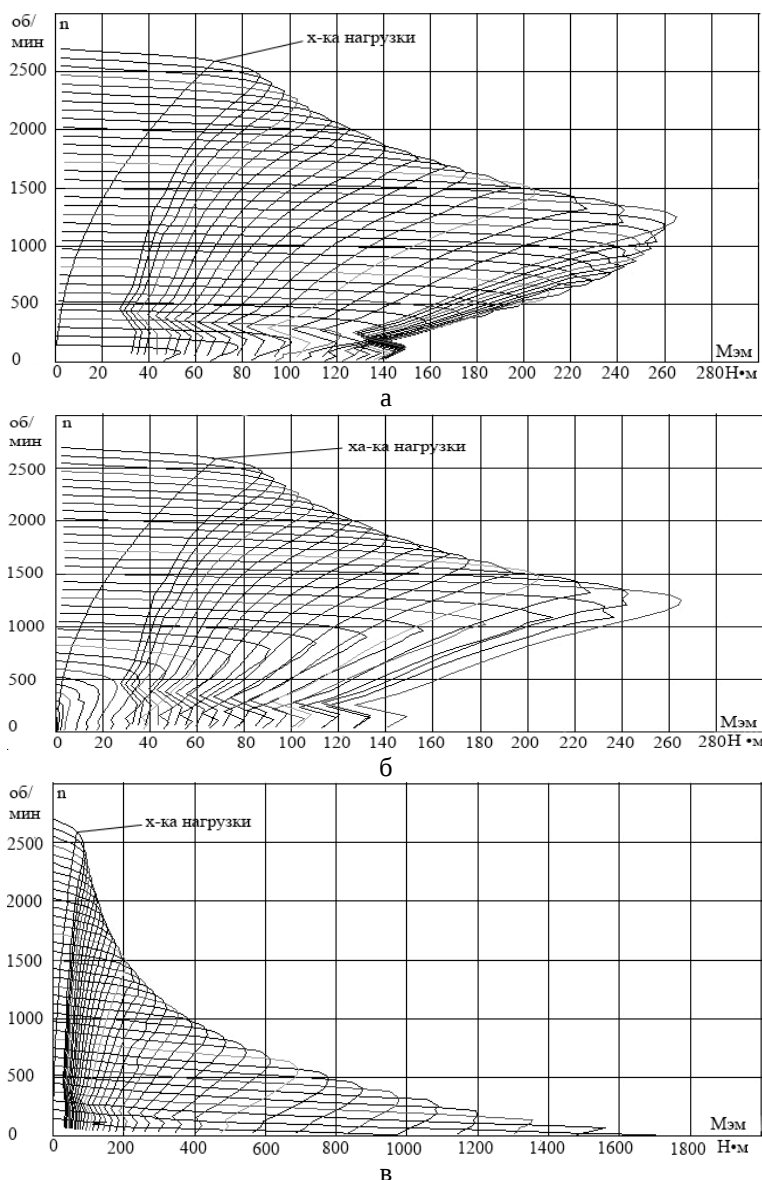


Рис.2 – Семейства механических характеристик при различных законах: а –  $U/f = \text{const}$ ; б –  $U/f^2 = \text{const}$ ; в –  $\Psi_2 = \text{const}$

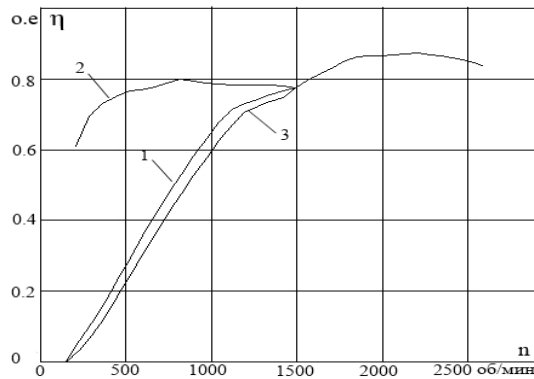


Рис.4 – Изменение КПД двигателя в диапазоне регулирования: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

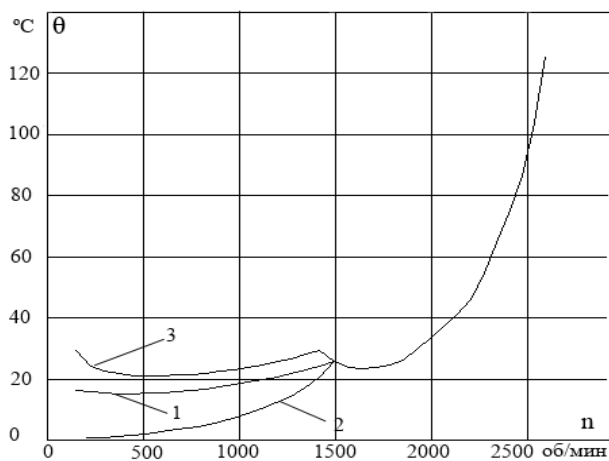


Рис.5 – Изменение температур обмотки статора двигателя в диапазоне регулирования:  
1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

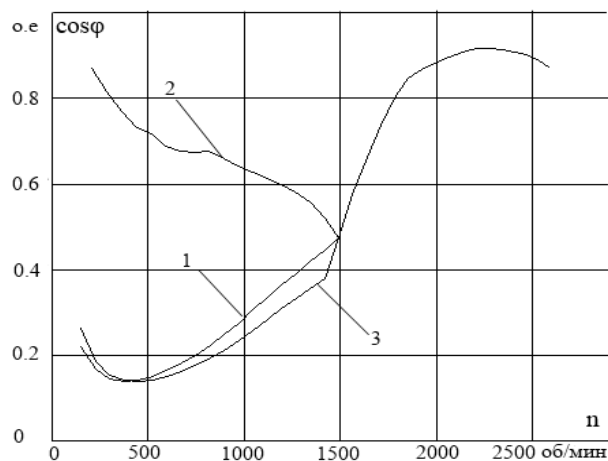


Рис.6 – Изменение коэффициента мощности двигателя в диапазоне регулирования:  
1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

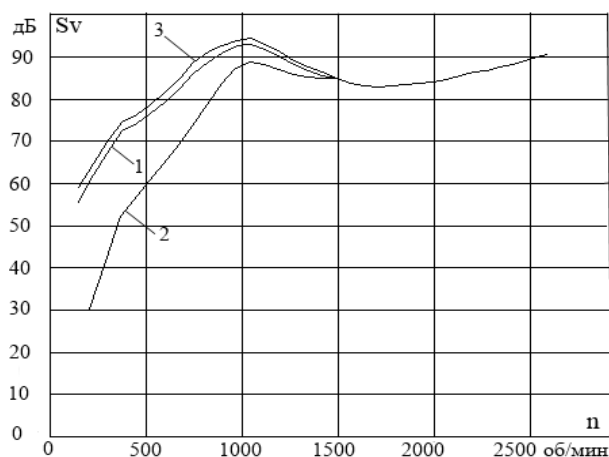


Рис.7 – Изменение виброскорости двигателя в диапазоне регулирования:  
1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

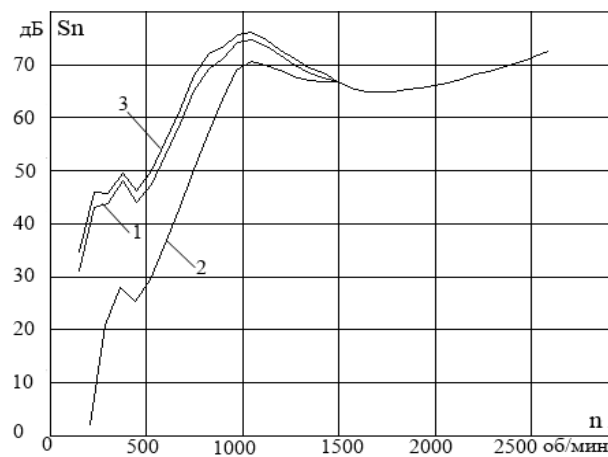


Рис.8 – Изменение магнитного шума двигателя в диапазоне регулирования:  
1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

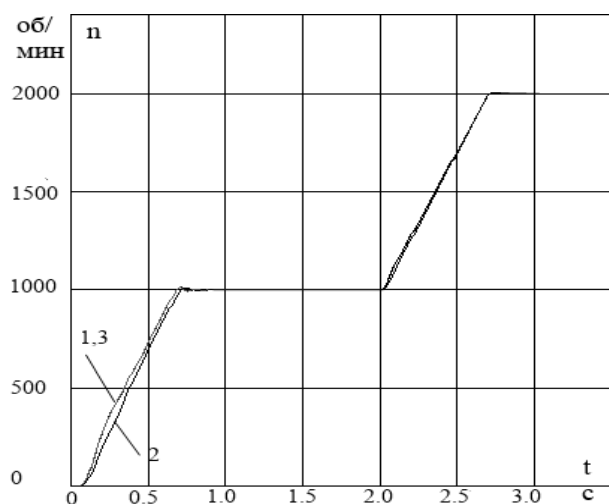


Рис.9 – Изменение частоты вращения двигателя в динамических режимах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

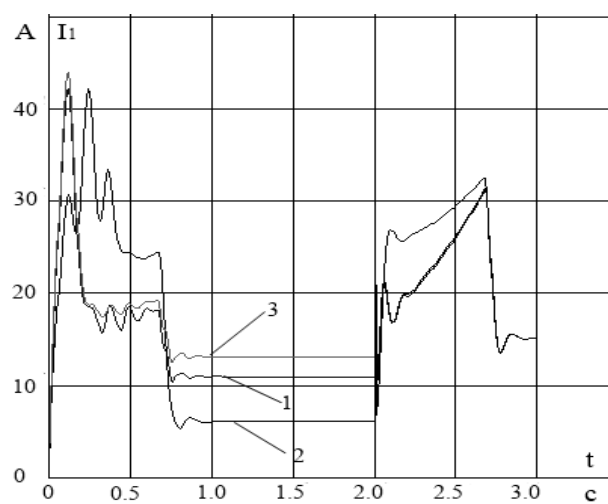


Рис.10 – Изменение потребляемого двигателем тока в динамических режимах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

При механических расчетах РАД рассматриваются три фактора, характеризующие механическое состояние, - жесткость вала, прочность вала и динамическая грузоподъемность подшипников [15]. Для оценки механического состояния РАД при регулировании предлагается рассмотреть эти же факторы в динамических режимах работы в соответствии с заданной тахограммой.

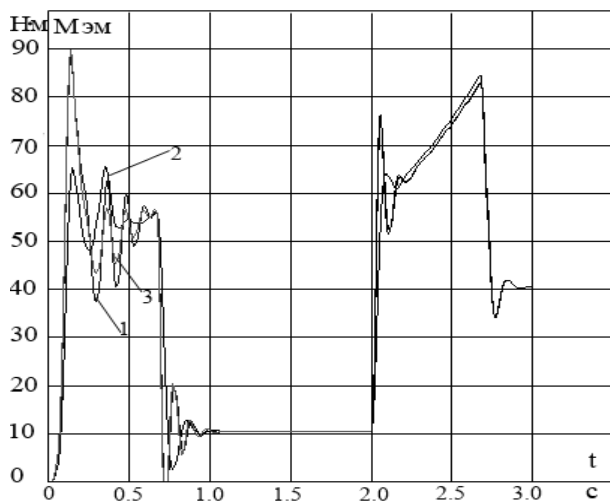


Рис.11 – Изменение электромагнитного двигателя в динамических режимах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

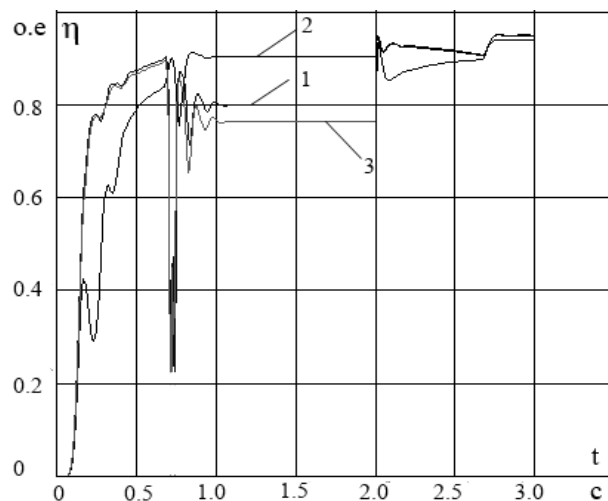


Рис.12 – Изменение КПД двигателя в динамических режимах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

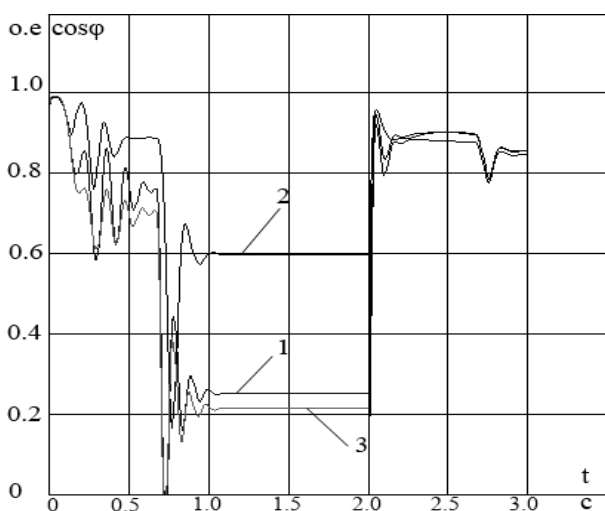


Рис.13 – Изменение коэффициента мощности двигателя в динамических режимах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

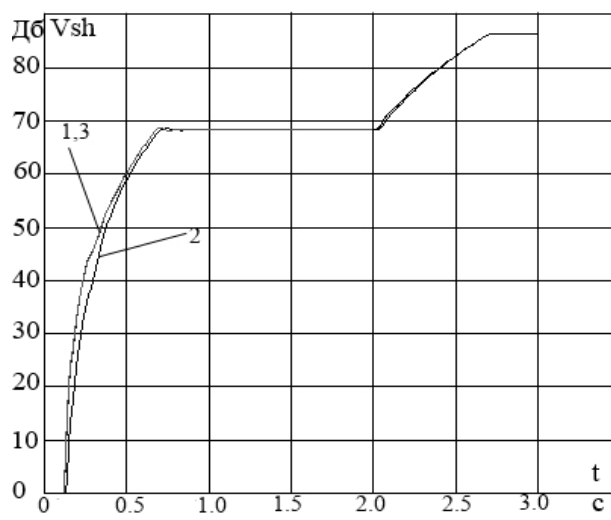


Рис.14 – Изменения вентиляционного шума РАД при различных законах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

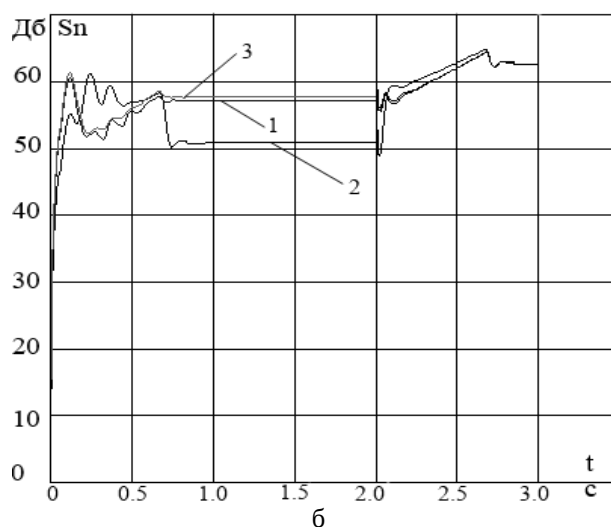
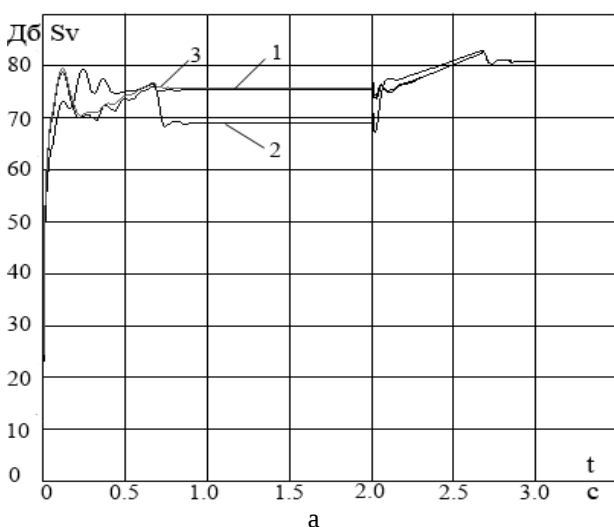


Рис.15 – Виброскорость (а) и магнитный шум (б) двигателя в динамических режимах при различных законах: 1 –  $U/f = \text{const}$ ; 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ; 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

При расчете вала на жесткость определяющим является механический показатель - результирующий прогиб вала  $f$  (рис.16,а). Определение изменений расчетной динамической грузоподъемности подшипников  $C_b$  при регулировании выполняется аналогично с учетом типа подшипника и характера нагрузки двигателя (рис.16, б). При расчете вала на прочность определяется приведенное механическое напряжение  $\sigma$ , учитывающее совместное действие напряжений изгиба и кручения (рис.16, в). При анализе принято сочленения двигателя с исполнительным механизмом с помощью упругой муфты. В рассматриваемой электрической машине используются шарикоподшипники. При исследованиях принят характер нагрузки с умеренными толчками. Используется коэффициент перегрузки, равный 2,5 для реверсивных машин.

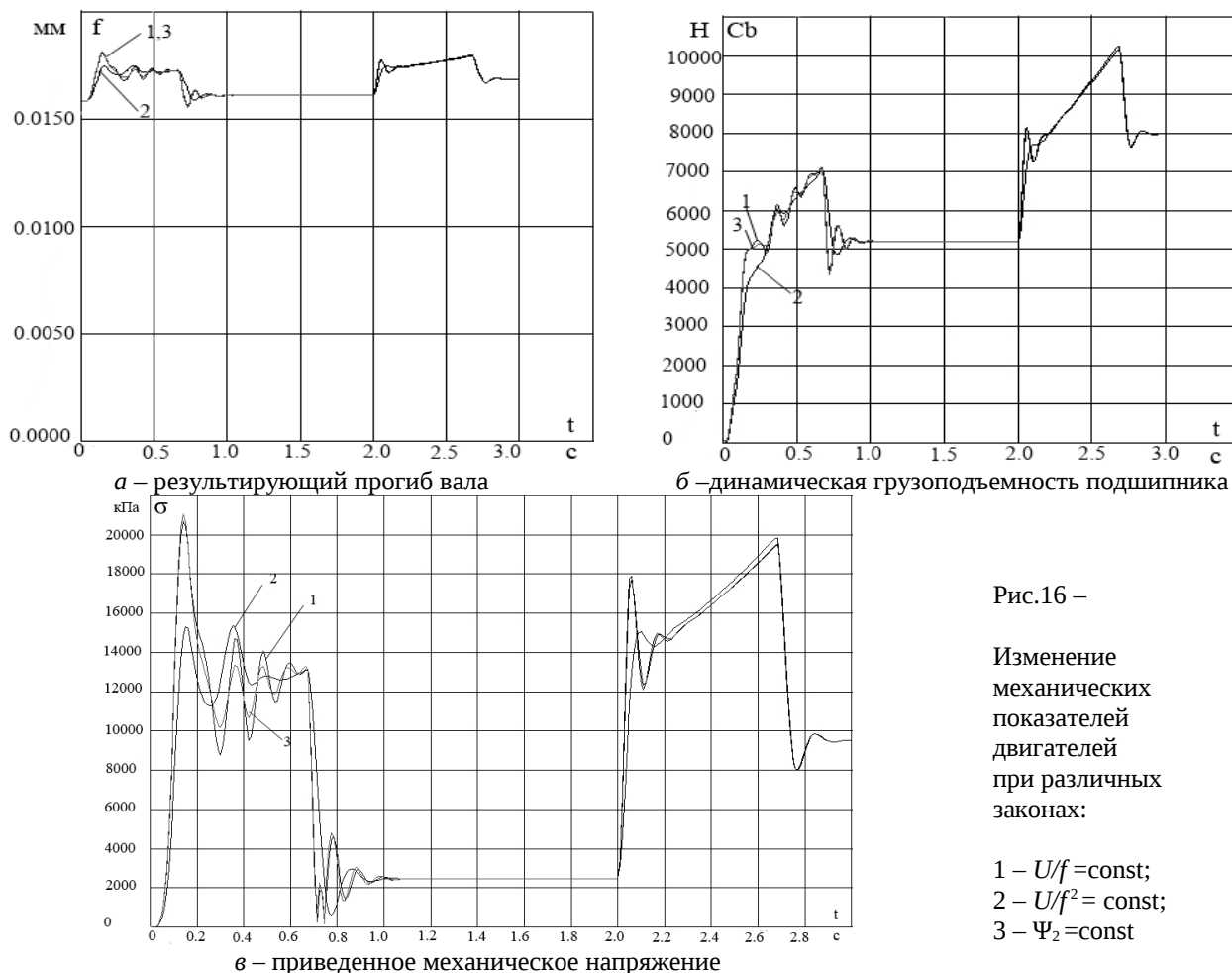


Рис.16 –

Изменение механических показателей двигателей при различных законах:

- 1 –  $U/f = \text{const}$ ;
- 2 –  $U/f^2 = \text{const}$ ;
- 3 –  $\Psi_2 = \text{const}$

**Выводы.** 1. Поскольку напряжение питания двигателя выше базовой настройки преобразователя (380 В, 50 Гц) неизменно, механические характеристики для трех рассматриваемых законов частотного управления во второй зоне являются одинаковыми. Существенное отличие механических характеристик имеет место в первой зоне, особенно для закона, обеспечивающего постоянство потокосцепления ротора.

2. Меньшие значения потребляемых двигателем токов (соответственно температур нагрева обмотки статора) и большие значения КПД и коэффициента мощности двигателя в первой зоне наблюдаются при законе частотного управления  $U/f^2 = \text{const}$  по сравнению с другими рассматриваемыми законами, .

3. Виброскорость и шум магнитного происхождения большие в первой зоне при законе частотного управления  $\Psi_2 = \text{const}$ .

4. Поскольку интенсивность изменения параметра регулирования (частоты напряжения питания РАД) одинакова для всех рассматриваемых законов характеристики изменения частоты вращения при работе на заданную тахограмму приблизительно одинаковы.

5. Динамические характеристики потребляемого тока, электромагнитного момента, КПД и коэффициента мощности двигателя отличаются при различных законах частотного управления.

6. От закона частотного управления зависит характер переходных зависимостей виброакустических показателей магнитного происхождения, а также вентиляционного шума.

7. Рассмотрение динамических характеристик механических показателей позволяет определить приоритет закона с точки зрения бросков этих показателей.

**Список литературы:** 1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: моногр. / Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с. 2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320с., ил. 3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с. 4. Пивняк Г.Г., Волков О.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. Монография, - Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с. 5. Петрушин В.С., Таньков А.А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления // "Електромашинобудування та електрообладнання": Респ. міжвід.наук.-техн. зб., вип. 55, 2000. – С. 11–15. 6. Петрушин В.С. Приведенные затраты асинхронных двигателей в частотном электроприводе при различных законах управления // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 56. – С. 51–54. 7. Петрушин В.С. Регулировочные характеристики АД в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянства потокосцеплений // Електротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал. – 2002. – №2. – С. 53–55. 8. Петрушин В.С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" // Одесса, Наука и техника, 2006, – 320 с. 9. Петрушин В.С., Якимец А.М. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2001. – Вып. 10. – С. 156–157. 10. Петрушин В.С., Бухалфа Бендахман, Якимец А.М., Каленик О.В. Корректировка расчета энергетических показателей регулируемых асинхронных двигателей в неустановившихся режимах // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід.наук.-техн. зб., вип. 75, 2010, С. 41–45. 11. Петрушин В.С., Якимец А.М., Еноктаев Р.Н. Моделирование регулируемых асинхронных электроприводов с согласующими редукторами и трансформаторами // Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" №2, 2015. – С. 26–30. 12. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт „DIMASDrive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001. 13. Шумилов Ю.А., Герасимчук В.Г. Исследование магнитных возмущающих сил асинхронного двигателя при питании от статического преобразователя частоты // Техн. электродинамика, 1997. – №4. – С.44– 48. 14. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоиздат, 1990. – 374 с. 15. Петрушин В.С., Каленик О.В. Анализ механических показателей асинхронного двигателя при различных способах пуска // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» науково-виробничого журналу - Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 247–250.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shreiner R.T. Matematicheskoe modelirovanie elektropriwodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty: monogr. Ekaterinburg: URO RAN, 2000. Print. 2. German-Galkin S.G. Komp'uternoe modelirovanie poluprovodnikovыkh sistem v MATLAB 6.0: Uchebnoe posobie. SPb.: KORONA, 2001. Print. 3. Sokolovskii G.G. Elektroprirody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. Moscow: Izdatel'skii tsentr «Akademiia», 2006. Print. 4. Pivniak G.G., Volkov O.V. Sovremennyye chastotno-reguliruyemye asinkhronnyye elektroprirody s shirotno-impul'snoi moduliatsiei. Monografiia. Dnepropetrovsk: Natsional'nyi gornyi universitet, 2006. Print. 5. Petrushin V.S., Tan'kov A.A. "Energeticheskie pokazateli asinkhronnogo dvigatelya v chastotnom elektroprihode pri razlichnykh zakonakh upravleniia " "Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia": Resp. mizhvid.nauk.-tekh. zb., No 55, 2000. 11–15. Print. 6. Petrushin V.S. Privedennyye zatraty asinkhronnykh dvigatelei v chastotnom elektroprihode pri razlichnykh zakonakh upravleniia. Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia: Resp. mizhvid. nauk.-tekh. zb, 2001. No 56, 51–54. Print. 7. Petrushin V.S. Regulirovochnyye kharakteristiki AD v chastotnom elektroprihode pri zakonakh upravleniia, obespechivaiushchikh postoianstva potokostseplenii. Elektrotekhnika i elektromekhanika: Naukovo-praktichnyi zhurnal, 2002. No 2. 53–55. Print. 8. Petrushin V.S. Uchebnoe posobie "Asinkhronnyye dvigately v reguliruemom elektroprihode". Odessa: Nauka i tekhnika, 2006. Print. 9. Petrushin V.S., Iakimets A.M. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov asinkhronnykh dvigatelei pri chastotnom regulirovanii. Problemy avtomatizirovannogo privoda. Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI", 2001. No. 10. 156–157. Print. 10. Petrushin V.S., Bukhalfa Bendakhman, Iakimets A.M., Kalenik O.V. Korrekcirovka rascheta energeticheskikh pokazatelei reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei v neustanovivshikhsia rezhimakh. Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia: Mizhvid.nauk.-tekh. zb., No. 75. 2010. Print. 11. Petrushin V.S., Iakimets A.M., Enoktaev R.N. Modelirovanie reguliruemyykh asinkhronnykh elektropriwodov s soglasuiushchimi reduktorami i transformatorami // Naukovo-praktichii zhurnal "Elektrotekhnika i Elektromekhanika". No2. 2015. Print. 12. Petrushin V.S., Riabinin S.V., Iakimets A.M. Programmnyi produkt „DIMASDrive”. Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniia asinkhronnykh kortkozamknutykh dvigatelei sistem reguliruemogo elektropriroda (svidetel'stvo o registratsii programmy PAN#4065). – K.: Gosudarstvennyi departament intellektual'noi sobstvennosti, 26.03.2001. 13. Shumilov Yu.A., Gerasimchuk V.G. Issledovanie magnitnykh vozmushchaiushchikh sil asinkhronnogo dvigatelya pri pitanii ot staticheskogo preobrazovatelya chastoty: Tekhn. elektrodinamika, 1997. No. 4. 44–48. Print. 14. Unifitsirovannaia seriia asinkhronnykh dvigatelei Interelektro; Pod red. V.I. Radina. Moscow: Energoizdat, 1990. Print. 15. Petrushin V.S., Kalenik O.V. Analiz mekhanicheskikh pokazatelei asinkhronnogo dvigatelya pri razlichnykh sposobakh puska. Elektromekhanichni ta energozberigaiuchi sistemi. Tematichnii vipusk «Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriia i praktika» naukovo-virobnichogo zhurnalu - Kremenchuk: KrNU, 2012. No. 3/2012 (19). 247–250. Print.

*Поступила (received) 09.06.2015*