

УДК 629.021

DOI: 10.17022/00zb-z118

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТА НА ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРА ДОРОЖКИ КАЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО КОЛЬЦА ПОДШИПНИКА**К. А. Горбунова, В. А. Иванов***Чувашский государственный аграрный университет
428003, Чебоксары, Российская Федерация*

Аннотация. В статье приведены результаты исследований изменения диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника в зависимости от влияния допуска посадки вала со стандартным размером внутреннего кольца подшипника и твердости поверхности образца-вала.

С увеличением диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника радиальное биение наружного кольца увеличится.

Увеличение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника возможно при появлении внутренних напряжений из-за деформации, то есть несоблюдения требований допуска посадки, например, увеличенного натяга в соединении вала с внутренним кольцом подшипника.

Увеличение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника также возможно при нарушении его физико-химических свойств, например, при изменении твердости поверхности образца-вала.

В научной работе также рассматриваются результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью приборов и установки для контрольного измерения шероховатости поверхности, твердости образца-вала и диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника. Экспериментальные исследования были проведены с использованием методов математической статистики, статистического и дисперсионного анализов. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась на ЭВМ с использованием стандартных программ «MATLAB 6.5», «Statistica 10».

В целом, в результате анализа полученных данных мы можем сделать вывод о том, что при использовании вышеперечисленных приборов наблюдалось увеличение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника под влиянием посадки с натягом до 99 % и изменения твердости посадочной поверхности образца-вала до 0,1 %.

Ключевые слова: диаметр дорожки качения, подшипник качения, твердость поверхности, допуск посадки, натяг.

Введение. В большинстве случаев при работе сопрягаемого узла в опорах качения вследствие увеличения радиального зазора увеличивается износ и возникает отказ [4], [5]. Это связано с увеличением диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника, поскольку радиальное биение наружного кольца увеличивается из-за износа и деформации тел качения.

На увеличение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника существенное влияние оказывает поле допуска натяга вала с внутренним кольцом подшипника качения. При посадке сопрягаемых деталей с натягом во внутреннем кольце подшипника качения возникает внутреннее растягивающее напряжение и увеличивается остаточное напряжение. В этом случае увеличивается податливость структуры материала и его поверхности и снижается их сопротивляемость к различного рода повреждениям.

Радиальное биение подшипника увеличивается также из-за динамических нагрузок. При таких ударных нагрузках в подшипниковом узле чаще нарушается сплошность смазочного материала в поверхностях пар трения, при этом отдельные участки этого узла переходят в сухое трение. При сухом трении в парах трения окисные поверхности в некоторых участках истираются, атомы сближаются до межатомного расстояния и происходит прихватывание, а затем вырывание, тем самым увеличивается износ [1].

Для увеличения сопротивляемости к износу применяют различные технологические и конструктивные способы повышения износостойкости, в частности, путем закалки повышают твердость.

Поэтому в научной работе рассматривается вопрос влияния натяга в посадке и твердости поверхности контакта одного из элементов соединения (в данном случае вала) на изменение диаметра дорожки качения внутреннего кольца.

Цель исследований – определить влияние натяга в посадке образца-вала со внутренним кольцом подшипника и твердости поверхности вала на изменение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника.

Материалы и методы исследования. Анализ априорной информации показал, что на изменение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника качения влияет значительное количество факторов, к которым относятся: рабочая температура подшипникового узла, срез в смятие микронеровностей поверхностей контакта вала и кольца, действие центробежных сил, натяг в посадке и т. п. [2], [3]. Основными из них являются натяг в посадке и твердость посадочной поверхности.

Исследование влияния натяга в посадке и твердости поверхности контакта одного из элементов соединения (в данном случае вала) на изменение диаметра дорожки качения внутреннего кольца проводилось в трех сериях образцов-валов из стали 45, изготовленных по технологии завода-изготовителя. Каждая серия

состояла из 7 образцов с тремя посадочными местами на каждом. Общее количество исследованных объектов равнялось 63. Измерение посадочных размеров образцов-валов и внутренних колец подшипников осуществлялось на горизонтальном оптиметре ИКГ-3 (ГОСТ 5405-75 с погрешностью показателей $\pm 0,0003$ мм). На этом же приборе замеряли диаметр дорожки качения кольца по дну желоба до и после сборки соединений. Твердость посадочных поверхностей определялась на приборе для измерения твердости металлов и сплавов по методу Роквелла ТК-2М (ГОСТ 13407-67).

Химический состав материалов образцов-валов и колец подшипников определялся на стационарном универсальном стилоскопе СЛУ АЛ2.851.047 (ТУЗ-3.1844-84).

Определение значений твердости и уточнение химического состава материалов образцов-валов и колец подшипников осуществлялось с помощью оборудования лаборатории технического сервиса инженерного факультета ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ.

Шероховатость образцов-валов и колец оценивалась по параметру Ra (ГОСТ 19876-00) на профилографе-профилометре модели Абрис ПМ-7 снятием и обработкой профилограмм.

По геометрическим размерам посадочных поверхностей к каждому посадочному месту индивидуально подбирались внутреннее кольцо подшипника типоразмера 313 с обеспечением сопряжении натяга, предусмотренного планом проведения эксперимента. В целях исключения влияния дополнительных факторов на результаты эксперимента подготовка к сборке и сборка соединений с применением тепла осуществлялись при постоянных внешних условиях. С целью устранения возможного взаимного влияния посадок при сборке между соседними кольцами на образцах-вала обеспечивалось расстояние, равное 8 мм.

Предельное значение натяга, превышение которого может вызвать механическое разрушение кольца, определялось по формуле (1)

$$N_{\text{доп}} = 11.4[\sigma] \cdot N'' \cdot d / [(2N' - 2) \cdot 10^5] \quad (1),$$

где $N_{\text{доп}}$ – допустимый натяг, мкм; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение при растяжении (для подшипниковой стали $[\sigma] = 400$ МПа); N'' – коэффициент (для подшипников средней серии $N'' = 2,8$ [1]); d — диаметр вала, мм.

Результаты исследований и их обсуждение. Согласно плану проведения эксперимента на трех уровнях твердости посадочной поверхности образца-вала и семи значениях натяга в посадке с трехкратной повторностью в каждом сочетании было реализовано 63 опыта. Принятое количество повторности в зависимости от выбранной доверительно вероятности α и допустимой ошибки ε ($\alpha = 0,95$; $\varepsilon = 3,0$) согласовано с положением, изложенным в научных работах [6], [7].

Результаты поставленного эксперимента по каждому исследованному объекту представлены в табл. 1.

Таблица 1– Результаты двухфакторного эксперимента

Твердость, HRC	Натяг в соединении N , мкм							Сумма T, j
	5	15	25	60	70	100	120	
HRC 27–30	4	12	21	50	58	85	100	
	4	11	21	51	59	84	101	
	4	12	20	49	59	83	99	
Суммы	12	35	62	150	176	252	300	987
HRC 47–50	4	13	22	52	61	87	104	
	5	13	22	52	62	87	103	
	5	14	21	51	62	86	105	
Суммы	14	40	65	155	185	260	312	1031
HRC 58–60	5	14	22	53	63	89	107	
	5	13	23	54	62	90	107	
	4	14	23	53	63	88	106	
Суммы	14	41	68	160	188	267	320	1058
Сумма T, i	40	116	195	465	549	779	932	3076

Для количественной оценки результатов эксперимента был проведен двухфакторный дисперсионный анализ.

Математическая модель двухфакторного эксперимента представлена в следующем виде:

$$x_{i/n} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{n(ij)},$$

где μ — общий эффект всего эксперимента; A_i — эффект фактора А (натяга) на i -м уровне; B_j — эффект фактора В (твердости) на j -м уровне; AB_{ij} — эффект парного взаимодействия факторов А (натяга) и В (твердости) на уровнях i и j ; ($\varepsilon_{n(ij)}$) — ошибки эксперимента.

Вычисление средних квадратов произведено по формулам, приведенным в табл. 2, где также указаны числа степеней свободы для соответствующих сумм квадратов и результаты вычислений.

Таблица 2 – Дисперсионный анализ двухфакторного эксперимента при повторности опытов

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Суммы квадратов
Фактор А (натяг)	a-1	$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{T_i^2}{n \cdot b} - \frac{T^2}{n \cdot a \cdot b} = 77165,52$
Фактор В (твердость)	b-1	$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{T_j^2}{n \cdot a} - \frac{T^2}{n \cdot a \cdot b} = 122,31$
A×B	(a-1)(b-1)	$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{T_{ij}^2}{n} - \sum_{i=1}^a \frac{T_i^2}{n \cdot b} - \sum_{j=1}^b \frac{T_j^2}{n \cdot a} + \frac{T^2}{n \cdot a \cdot b} = 39,25$
Ошибка $\varepsilon_{n(ij)}$	$a \cdot b(n - 1)$	$SS_{ош} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijn}^2 - \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{T_{ij}^2}{n} = 20,00$
Сумма	$a \cdot b(n - 1)$	$SS_{общ} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijn}^2 - \frac{T^2}{n \cdot a \cdot b} = 77347,0$

Результаты дисперсионного анализа и формулы их вычислений представлены в табл. 3, а результаты двухфакторного эксперимента – в виде поверхности отклика в трехмерном пространстве (рисунок).

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что действие всех факторов достоверно. На это указывают результаты оценки достоверности действия факторов по критерию Фишера. Наибольшее влияние на изменение диаметра дорожки качения по дну желоба оказывает натяг в посадке. Доля этого фактора составляет 99 % от всей суммы учтенных и неизвестных факторов. Взаимодействие факторов HRC×N невелико – его доля – составляет лишь 0,05 %. Слабое влияние оказывала и твердость посадочной поверхности вала.

Таблица 3 – Результаты двухфакторного дисперсионного анализа

Показатели	Факторы их взаимодействия		
	натяг	твердость	A×B
	N	HRC	N×HRC
Сумма квадратов SS_i	77165,52	122,31	39,25
Доля факторов $\eta = SS_i / SS_{общ}$	0,99765	0,00158	0,0005
Степень свободы f_i	6	2	12
Средние квадраты $\sigma_i^2 = SS_i / f_i$	12860,92	61,155	3,27
Дисперсия ошибки $\sigma_z^2 = SS_{ош} / a \cdot b(n - 1)$		0,476	
Значение критерия Фишера $F_i = \sigma_i^2 / \sigma_z^2$	6121,798	256,954	6,870
Табличное значение критерия Фишера	2,25	3,15	1,92

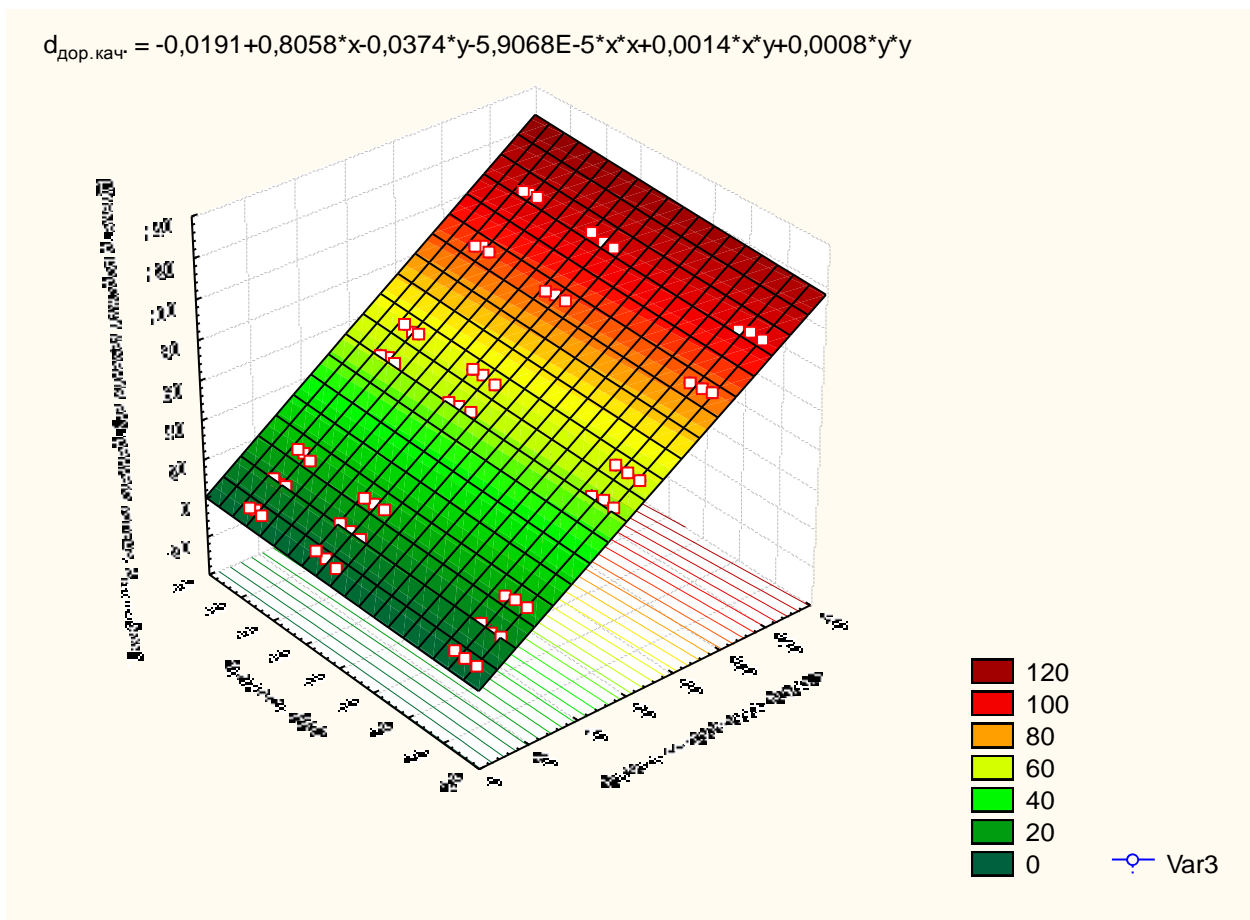


Рис. Изменение диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника в зависимости от твердости посадочной поверхности вала и натяга в посадке (материал вала – сталь 45, кольца – ШХ15)

Выводы. Анализ полученных результатов исследования изменений диаметра дорожки качения внутреннего кольца подшипника в зависимости от твердости посадочной поверхности вала и натяга в посадке позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на изменение диаметра дорожки качения по дну желоба оказывает натяг в посадке. Доля этого фактора составляет 99 % от всей суммы учтенных и неизвестных факторов.

Значение посадочных натягов, рассмотренных в проведенных экспериментах, оказались не опасными для материала кольца с точки зрения прочности и не приводили к разрыву.

Результаты исследования могут быть использованы при выборе посадок в узлах подшипников качения отремонтированных тракторов.

Литература

1. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) / Д. Н. Гаркунов. – М.: «Издательство МСХА», 2001. – 616 с.
2. Иванчиков, Ю. В. Влияние параметров контакта на долговечность соединений с натягом (на примере подшипниковых посадок) / Ю. В. Иванчиков, Ю. Н. Доброхотов, Р. В. Андреев // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 1 (1). – С. 57-63.
3. Калентичев, П. В. Исследование причин отказов узлов подшипников качения сельскохозяйственных тракторов / П. В. Калентичев, Ю. В. Иванчиков, Р. В. Андреев // Молодежь и инновации: материалы XV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – С. 350-355.
4. Лебедев, В. Г. Анализ оценочных показателей технического состояния плунжерных пар ТНВД дизеля / В. Г. Лебедев, В. А. Иванов // Перспективы развития технического сервиса в агропромышленном комплексе: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. – С. 89-90.
5. Лебедев, В. Г. Определение мест расположения и величины износа деталей плунжерной пары топливного насоса высокого давления / В. Г. Лебедев, В. А. Иванов // Рациональное природопользование и социально-экономическое развитие сельских территорий как основа эффективного функционирования АПК региона: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием,

посвященной 80-летию со дня рождения заслуженного работника сельского хозяйства Российской Федерации, почетного гражданина Чувашской Республики Айдака Аркадия Павловича. – Чебоксары: Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. – С. 174-178.

6. Метрология, стандартизация и сертификация / А. И. Аристов, Л. И. Карпов, В. М. Приходько, Т. М. Раковщик. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 384 с.

7. Павлов, А. Р. Повышение долговечности подшипниковых узлов при ремонте / А. Р. Павлов, Ю. В. Иванчиков // Студенческая наука – первый шаг в академическую науку: материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции с участием школьников 10-11 классов. – Чебоксары: Чувашская государственная академия, 2018. – С. 167-169.

Сведения об авторах

1. **Горбунова Кристина Андреевна**, инженер, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К.Маркса, 29; e-mail: Kristinagorbunova088@qmail.com, тел. +7-908-306-23-43;

2. **Иванов Владимир Андреевич**, кандидат технических наук, Чувашский государственный аграрный университет, 428003, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. К.Маркса, 29; e-mail: Vladimir21VA@mail.ru, тел. +7-906-384-47-62.

INVESTIGATION OF IMPACT OF CONTACT PARAMETERS ON CHANGE OF RACE DIAMETER OF INNER BEARING RING

K. A. Gorbunova, V. A. Ivanov
Chuvash State Agrarian University
428003, Cheboksary, Russian Federation

Abstract. *The article presents the results of studies of changes in the diameter of the raceway of the inner ring of a bearing depending on the influence of the tolerance of the shaft fit with the standard size of the inner ring of the bearing and the surface hardness of the sample shaft.*

As the raceway diameter of the bearing inner ring increases, the radial runout of the outer ring increases.

An increase in the diameter of the raceway of the inner ring of the bearing is possible when internal stresses appear due to deformation, that is, non-compliance with the tolerance requirements for the fit, for example, increased interference in the joint between the shaft and the inner ring of the bearing.

An increase in the diameter of the raceway of the inner ring of the bearing is also possible if its physical and chemical properties are violated, for example, when the hardness of the surface of the sample-shaft changes.

The scientific work also examines the results of experimental studies carried out with the help of instruments and an installation for control measurement of surface roughness, hardness of the sample-shaft and the diameter of the raceway of the inner ring of the bearing. Experimental studies were carried out using methods of mathematical statistics, statistical and analysis of variance. The processing of the results of experimental studies was carried out on a computer using the standard programs "MATLAB 6.5", "Statistica 10".

In general, as a result of the analysis of the data obtained, we can conclude that when using the above-mentioned devices, an increase in the diameter of the raceway of the inner ring of the bearing was observed under the influence of an interference fit up to 99% and a change in the hardness of the seating surface of the sample-shaft up to 0.1%.

Key words: *raceway diameter, rolling bearing, surface hardness, fit tolerance, interference.*

References

1. Garkunov, D. N. Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost') / D. N. Garkunov. – М.: «Издательство MSKHA», 2001. – 616 с.

2. Ivanshchikov, YU. V. Vliyanie parametrov kontakta na dolgovechnost' soedinenij s natyagom (na primere podshipnikovyh posadok) / YU. V. Ivanshchikov, YU. N. Dobrohotov, R. V. Andreev // Vestnik CHuvashskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. – 2017. – № 1 (1). – С. 57-63.

3. Kalentichiev, P. V. Issledovanie prichin otkazov uzlov podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennyh traktorov / P. V. Kalentichiev, YU. V. Ivanshchikov, R. V. Andreev // Molodezh' i innovacii: materialy XV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov. – CHEboksary: CHuvashskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya, 2019. – С. 350-355.

4. Lebedev, V. G. Analiz ocenочnyh pokazatelej tekhnicheskogo sostoyaniya plunzhernyh par TNVD dizelya / V. G. Lebedev, V. A. Ivanov // Perspektivy razvitiya tekhnicheskogo servisa v agropromyshlennom komplekse: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – CHEboksary: CHuvashskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya, 2014. – С. 89-90.

5. Lebedev, V. G. Opredelenie mest raspolozheniya i velichiny iznosa detalej plunzhernoj pary toplivnogo nasosa vysokogo davleniya / V. G. Lebedev, V. A. Ivanov // Racional'noe prirodopol'zovanie i social'no-ekonomicheskoe razvitiye sel'skih territorij kak osnova effektivnogo funkcionirovaniya APK regiona: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 80-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo rabotnika sel'skogo hozyajstva Rossijskoj Federacii, pochetnogo grazhdanina CHuvashskoj Respubliki Ajdaka Arkadiya Pavlovicha. –CHEboksary: CHuvashskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya, 2017. – S. 174-178.

6. Metrologiya, standartizaciya i sertifikaciya / A. I. Aristov, L. I. Karpov, V. M. Prihod'ko, T. M. Rakovshchik. – M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2006. – 384 s.

7. Pavlov, A. R. Povyszenie dolgovечnosti podshipnikovyh uzlov pri remonte / A. R. Pavlov, YU. V. Ivanshchikov // Studencheskaya nauka – pervyj shag v akademicheskuyu nauku: materialy Vserossijskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s uchastiem shkol'nikov 10-11 klassov. – CHEboksary: CHuvashskaya gosudarstvennaya akademiya, 2018. – S. 167-169.

Information about authors

1. **Gorbunova Kristina Andreevna**, engineer, Chuvash State Agrarian University, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, K. Marx str., 29; e-mail: Kristinagorbunova088@gmail.com, tel. + 7-908-306-23-43;

2. **Ivanov Vladimir Andreevich**, Candidate of Technical Sciences, Chuvash State Agrarian University, 428003, Chuvash Republic, Cheboksary, K. Marx str. 29; e-mail: Vladimir21VA@mail.ru, tel. + 7-906-384-47-62.

УДК 621.3

DOI: 10.17022/7rws-wm48

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ ТЕНДЕНЦИЙ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СЕЛЬСКИМИ ХОЗЯЙСТВАМИ В РЕГИОНАХ РФ

А. П. Дарманян, А. А. Черняев, А. Р. Бражников

*Волгоградский государственный аграрный университет
400002, г. Волгоград, Российская Федерация*

Аннотация. В статье предложена современная методология моделирования и сравнительного анализа тенденций потребления электроэнергии сельскими хозяйствами в регионах РФ: Приволжском ФО, Центральном ФО и в Республике Татарстан за период 2012-2019 гг. по данным Росстата. Анализ статистических данных осуществлялся с учетом безразмерных величин потребления электроэнергии за 2012 г., который принят за начало временного периода. Для РФ и каждого региона были построены линейные математические модели, которые отображают статистические данные потребления электроэнергии сельскими хозяйствами. С помощью найденных моделей был осуществлен сравнительный анализ тенденций потребления электроэнергии. При этом было выявлено, что увеличение скорости потребления электроэнергии сельскими хозяйствами в Республике Татарстан в исследуемый период практически соответствовала этому же показателю на территории РФ. В то же время данный показатель в ЦФО был почти в 2 раза выше, чем в среднем по РФ, и, наоборот, в ПФО этот показатель был почти в 2 раза ниже, чем в среднем по РФ и в Республике Татарстан.

Ключевые слова: статистика, временные ряды, моделирование, тенденция, потребление электроэнергии.

Введение. Анализ потребления электроэнергии сельскими хозяйствами в РФ и в отдельных регионах важен ввиду того, что этот показатель отражает состояние экономики страны и региона, а также тенденции его развития в сфере АПК. Известно, что между потреблением электроэнергии и величиной ВВП существует положительная корреляционная зависимость, причем установлено, что, чем больше потребление электроэнергии, тем выше ВВП [1]. Поэтому нужно не только оценивать потребление электроэнергии в отдельном регионе, но и выявлять его тенденцию за определенный временной период в сравнении с другими регионами и в целом со средней величиной этого показателя по РФ. В работах, посвященных прогнозированию развития энергетики в РФ [6], в официальных отчетах Росстата [5] нет информации о потреблении электроэнергии в регионах РФ.

На наш взгляд, такое положение отчасти объясняется отсутствием определенной методики анализа тенденций изменения изучаемых показателей в соответствии с временными закономерностями, которые были сформированы из величин с существенно различными значениями. Эти закономерности выявляются при анализе статистических данных о потреблении электроэнергии сельскими хозяйствами в различных регионах РФ, которые существенно отличаются друг от друга особенностями территорий, численностью населения и другими макроэкономическими показателями. Однако такую задачу можно успешно решить, применяя методы математического моделирования [2], [3] и, в частности, метода анализа временных рядов [4].