

Технические науки

УДК 621.3.048.1

Горбунов Роман Викторович
Roman Gorbunov



ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТНОСИТЕЛЬНО КОРПУСА В СИСТЕМАХ ЗАЗЕМЛЕНИЯ TN-C, TN-S, TN-C-S

DIAGNOSTICS OF ISOLATION DAMAGES OF STATOR'S WINDINGS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS CONCERNING THE CASE IN SYSTEMS OF GROUNDING OF TN-C, TN-S, TN-C-S

Рассмотрен предаварийный режим асинхронного электродвигателя, имеющего сниженное сопротивление изоляции обмотки статора относительно корпуса электродвигателя на основе математической модели. Получены зависимости величины тока утечки на корпус электродвигателя и напряжения на корпусе в зависимости от сопротивления в цепи РЕ-проводника и от сопротивления в месте повреждения изоляции в системах заземления TN-S, TN-C-S. Получена зависимость напряжения на корпусе электродвигателя при увеличении сопротивления в цепи общего PEN-проводника при подключении различных по мощности однофазных нагрузок в системе заземления TN-C. Для ведения объективной диагностики, а также с целью увеличения уровня электробезопасности рекомендуется отслеживать ток утечки совместно с сопротивлением в цепи защитного или совмещенного защитного и нулевого рабочего проводников

Ключевые слова: диагностика, асинхронный электродвигатель, системы заземления, изоляция статорных обмоток, предаварийные режимы, математическое моделирование, ток утечки, защитный проводник, нулевой рабочий проводник

Pre-emergency operation of the asynchronous electric motor having the reduced resistance to isolation of a stator's windings concerning the electric motor case on the basis of mathematical model is considered. Dependences of size of leak current on the electric motor and tension case depending on resistance in a chain of PE of the conductor and from resistance in a place of damage of isolation in the systems of grounding of TN-S, TN-C-S are received. The dependence of tension on the electric motor case is also received at increase in resistance in a chain of the general PEN the conductor at various connections on the power of single-phase loadings in the system of TN-C grounding. For conducting objective diagnostics, and also for the purpose of increase in level of electrical safety it is recommended to trace leak current together with the resistance in a chain of protective or combined protective and zero work of conductors

Key words: diagnostics, anisochronous electric motor, systems of earthing, insulation of stator's windings, pre-emergency modes, mathematical modeling, current of drain, defensive conductor, zero work conductor

При эксплуатации асинхронных электродвигателей в элементах, подверженных неблагоприятным факторам (влажность, повышенная температура, механические нагрузки, сильные электрические поля), протекают процессы, ведущие к изменению свойств материалов, из которых состоят эти элементы. В совокупности эти процессы приводят к ухудшению характеристик всей машины, вплоть до выхода из строя.

Одним из важнейших элементов асинхронного двигателя, подвергающихся негативному воздействию, является изоляция статорных обмоток. Для электродвигателей до 100 кВт применяют в основном провода с эмалевой изоляцией ПЭТВ. Это провода повышенной термостойкости на основе полиэфирных лаков. В качестве дополнительной изоляции, предотвращающей контакт обмоток с магнитопроводом, а, следовательно, и корпусом электродвигателя, используется лакоткань и стеклоткань, представляющие собой шелковые, капроновые или хлопчатобумажные волокна, пропитанные лаком [2].

Нарушение изоляции между обмотками статора асинхронного электродвигателя и корпусом ведет к появлению тока утечки

на корпус, соединенный с РЕ (PEN)-проводником. Величина тока утечки зависит от сопротивления в цепи его протекания, включающей сопротивление в месте повреждения, сопротивления кабеля, питающего двигатель, сопротивление РЕ-провода и всех соединений [6], т.е. оно равно сумме сопротивлений петли «фаза-нуль» и изоляции фаз в месте повреждения.

На рис. 1 представлена схема, имитирующая повреждение изоляции асинхронного электродвигателя, выполненная в среде математического моделирования MatLab. Схема имитирует такие системы заземления с глухозаземленной нейтралью, как TN-C, TN-S, TN-C-S, где используется соединение корпуса с защитным РЕ- или PEN-проводниками, соединенными с нулевой точкой питающих трансформаторов [5]. Важной особенностью данной схемы является способ имитации повреждения изоляции статорных обмоток электродвигателя. Изоляция каждой фазы относительно корпуса на участке от коммутационного аппарата до электродвигателя характеризуется параллельно включенным емкостью сети и активным сопротивлением (фаза А – C1 и R1, фаза В – C2 и R2, фаза С – C3 и R3) [1, 8, 9].

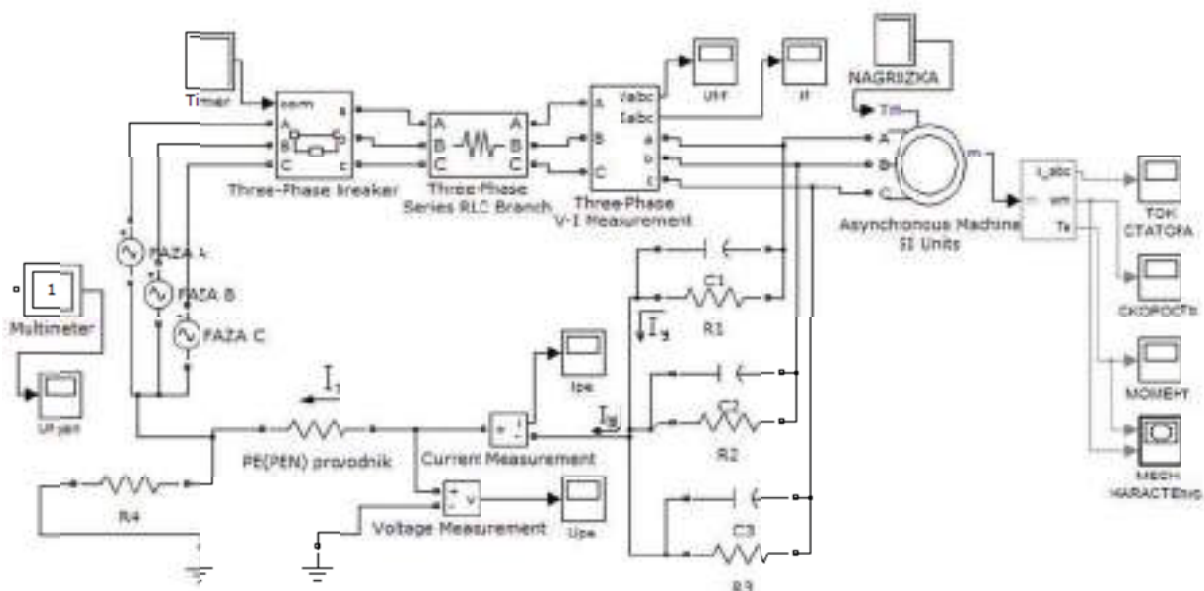


Рис. 1. Схема в среде математического моделирования MatLab для имитации повреждения изоляции обмотки фазы А (элемент на схеме – R1) статора в системах TN-C, TN-S, TN-C-S

При повышенном напряжении сопротивление изоляции может уменьшаться из-за образования объемных зарядов. Добавочная электронная проводимость приводит к увеличению электропроводности. Согласно закону Френкеля, в сильных электрических полях существует зависимость проводимости от силы электрического поля [11]

$$\gamma = \gamma_0 a^{\alpha \sqrt{E}}, \quad (1)$$

где γ – это проводимость в сильных полях;

γ_0 – проводимость в слабых полях;

a – постоянная;

E – напряженность электрического поля.

Исходя из этого, можно предположить, что с большей вероятностью выйдет из строя изоляция в начале обмотки статора электродвигателя. Следовательно, для имитации фазной изоляции допустимо подключить схемы замещения в начале обмоток.

Для моделирования коммутационного аппарата служит трехфазный выключатель Three-Phase Breaker, а в качестве сопротивления кабеля – трехфазный блок активных сопротивлений Tree-Phase Series RLC Branch 0,12 Ом, заменяющий сопротивление жил кабеля АВВГ 4(5)*35 L=25 м, а также переходных сопротивлений контактов Rпер (не более 0,05 Ом) [4, п. 28]. При моделировании был применен трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа «белочья клетка» мощностью 37 кВт и с частотой вращения 1480 об/мин. Схемы замещения фазных изоляций относительно корпуса соединены в одну точку и присоединены к PE(PEN)-проводу через блок измерения тока Current Measurement [10]. Емкость в схеме замещения изоляции электродвигателя относительно корпуса составляет 1нФ [1, рис. 2.26]. Активное сопротивление изоляции неповрежденных обмоток статора по 0,5 Мом. Сопротивление контура заземления 4 Ом.

С помощью модели, изображенной на рис. 1, были имитированы предаварийные режимы при различных сопротивлениях в цепи протекания тока утечки I_y . На рис. 2 показаны полученные зависимости I_y в функции изменения активного сопротивления PE-проводника R_{pe} и активного R1 в месте повреждения изоляции статорной обмотки.

Полученные кривые указывают на слабую зависимость тока утечки от сопротивления PE-проводника в диапазоне до 50 Ом и сильное изменение тока в диапазоне от 100 Ом и выше (обрыв, неудовлетворительная протяжка контактов). При сопротивлении в месте повреждения изоляции R1=2 кОм – ток утечки снизился с 110 мА (при сопротивлении $R_{pe}=4$ Ом) до 80 мА (при сопротивлении $R_{pe}=0,5$ кОм), что составило 72 %. Однако при увеличении сопротивления PE(PEN)-провода наблюдается также и рост напряжения на корпусе электродвигателя, что негативно влияет на уровень электробезопасности. Исходя из этого, можно утверждать, что одного лишь тока утечки в качестве диагностического признака состояния изоляции относительно корпуса недостаточно.

Для отыскания таких повреждений необходимо вести совместный контроль тока и напряжения на корпусе электродвигателя. На рис. 3 представлены зависимости напряжения на корпусе асинхронного электродвигателя при разных сопротивлениях в месте повреждения и в цепи PE(PEN)-провода. Из графиков видно, что напряжение на корпусе при сопротивлении PE(PEN)-провода $R_{pe} = 50$ Ом и сопротивлении изоляции R1 в месте повреждения 1 кОм – не превышает 10 В. В случае увеличения активного сопротивления R_{pe} до 0,5 кОм на корпусе может присутствовать напряжение, достигающее 70 В.

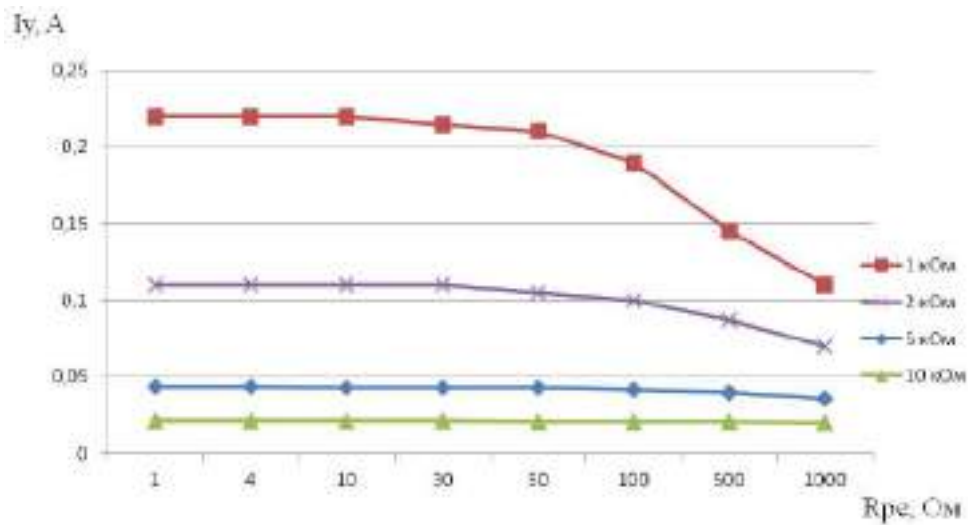


Рис. 2. Ток утечки на корпус асинхронного электродвигателя при разных активных сопротивлениях изоляции в фазе А – R_1 (1; 2; 5; 10 кОм) при $R_2=R_3=const=0,5$ МОм и активном сопротивлении в цепи РЕ-проводника – R_{pe}

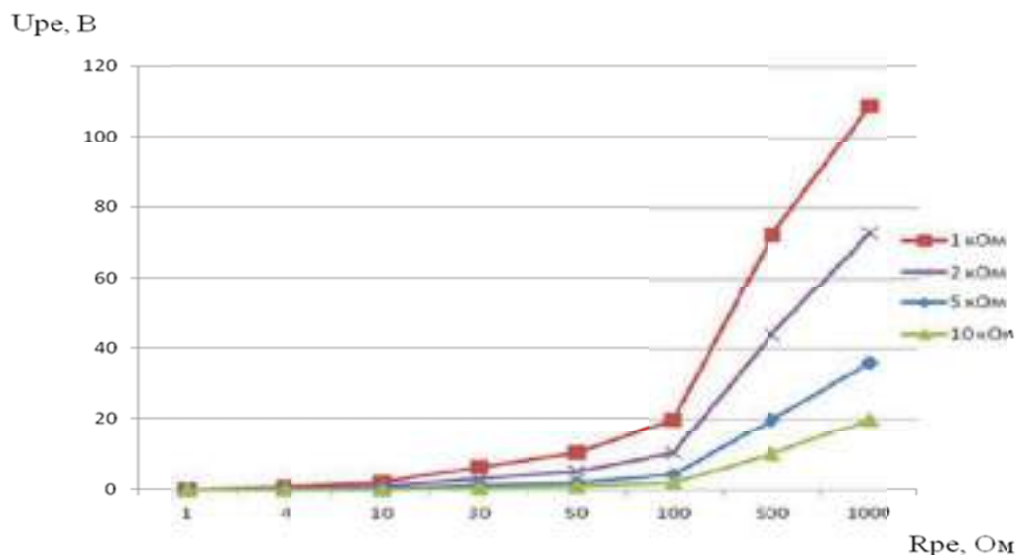


Рис. 3. Напряжение на корпусе асинхронного электродвигателя при разных сопротивлениях изоляции R_1 в месте повреждения ($R_1=1;2;5;10$ кОм) при $R_2=R_3=const=0,5$ МОм и активном сопротивлении R_{pe} в цепи РЕ-проводника

На реальных предприятиях сеть электроснабжения более разветвленная и имеет большее число электроприемников, чем указано на рис. 1. Это приводит к появлению в сети режимов с неравномерной нагрузкой фаз. А при системе заземления TN-C ситуация с напряжением на корпусе электродвигателя может усугубиться, т.к. через PEN-проводник протекают токи на-

грузки, вызывающие падение напряжения в месте ухудшения присоединения PEN-проводника к PEN-шине. На рис. 4 приведена схема для математического моделирования режимов работы сети с системой заземления TN-C при наличии однофазной нагрузки, регулируемой мощности NAGRU-ZKA2, подключаемой через однополюсный выключатель Breaker.

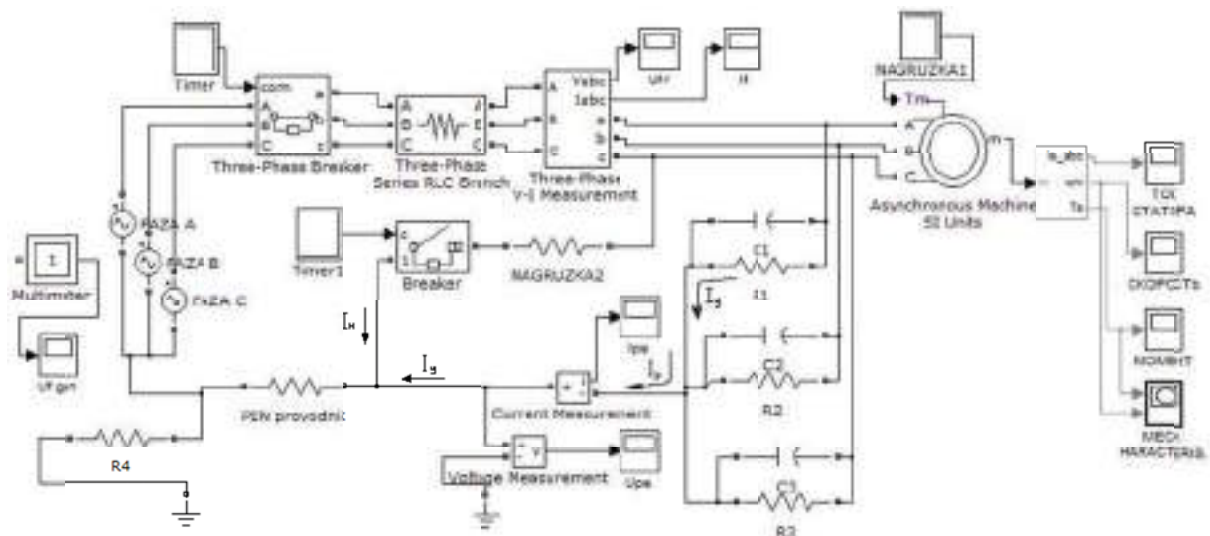


Рис. 4. Схема в среде математического моделирования MatLab для имитации повреждения изоляции фазы А (R1) обмотки статора в системе с глухозаземленной нейтралью и однофазной нагрузкой

В схеме моделировались режимы с мощностями однофазной нагрузки – 1; 2; 5; 10; 30 кВт при наличии сниженного сопротивления изоляции $R1 = 10 \text{ кОм}$ в фазе А. Сопротивления PEN-проводника в месте присоединения к PEN-шине 0,1; 0,5; 1; 3; 5; 10 Ом.

В результате моделирования получены графики, изображенные на рис. 5. Из

графиков видно, что при наличии однофазной нагрузки в 10 кВт, напряжение на PEN-проводнике и корпусе асинхронного электродвигателя, при сопротивлении в месте присоединения PEN-проводника к PEN-шине 5 Ом будет превышать 100 В. Это говорит о еще большей опасности поражения электрическим током в сетях с PEN-проводником.

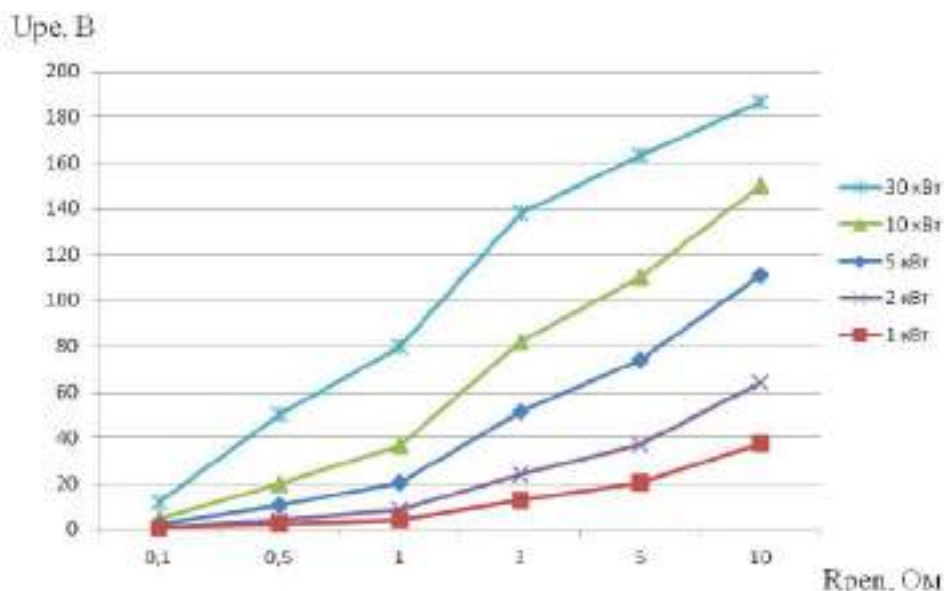


Рис. 5. Напряжение на корпусе асинхронного электродвигателя U_{pe} при сопротивлении в месте повреждения $R1 = 10 \text{ кОм}$, но при разных сопротивлениях в цепи PEN-провода и наличии однофазной нагрузки мощностью: 1, 2, 5, 10, 30 кВт

Для установления степени зависимости уровня напряжения на корпусе электродвигателя от сопротивления в месте повреждения было осуществлено моделирование с сопротивлением в месте повреждения (фаза А) – $R_1=1$ кОм. Результаты моделирования приведены на рис. 6. Максимальная

разница в напряжениях при сопротивлении $R_1=10$ кОм (рис. 5) и $R_1=1$ кОм (рис. 6) составила 4,5 %, что говорит об очень слабой зависимости уровня напряжения на корпусе электродвигателя и PEN-проводнике при предаварийном состоянии двигателя.

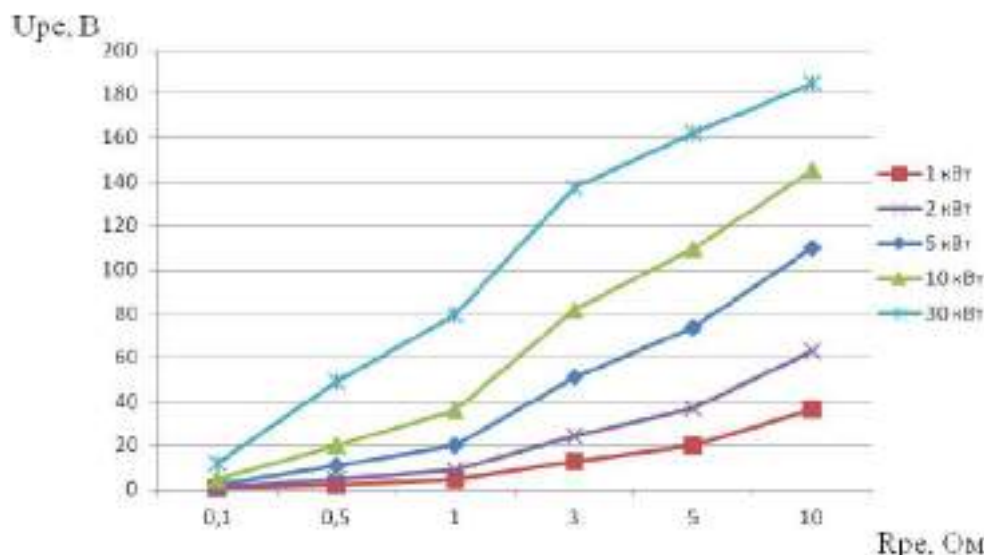


Рис. 6. Напряжение на корпусе асинхронного электродвигателя при сопротивлении в месте повреждения $R_1=1$ кОм, но при разных сопротивлениях в цепи PE провода и при наличии однофазной нагрузки

На основании приведенных результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1) при системе заземления TN-C напряжение на корпусе асинхронного электродвигателя в предаварийном состоянии (сопротивление в месте повреждения составляет $R_1=1-10$ кОм), соединенного с PEN-проводником, слабо зависит от сопротивления в месте повреждения;

2) ухудшение сопротивления присоединения PEN-проводника R_{pen} к PEN-шине в системе заземления TN-C приводит к значительному ухудшению условий электробезопасности из-за появления высоких уровней напряжения на PEN-проводнике и соединенных с ним корпусах электрооборудования (так, при $R_{pe}=5$ Ом и однофазной нагрузке 10 кВт – на корпусе электродвигателя будет присутствовать напряжение достигающее 100 В);

3) в системах заземления TN-S, TN-C-S, предусматривающих защитный про-

водник PE для подключения к корпусам электроприемников, опасный потенциал для обслуживающего персонала может возникнуть при значительных ухудшениях соединения PE-проводника к PE-шине (100 Ом и выше);

4) значительное увеличение погрешности при измерениях тока утечки может наступать при ухудшениях сопротивления присоединения PE-проводника к PE-шине (100 Ом и выше);

5) объективную оценку состояния изоляции статорной обмотки относительно корпуса электродвигателя можно осуществлять лишь при совместном контроле тока утечки I_y и суммы переходных сопротивлений PE и PEN-проводников, соединенных с корпусом электродвигателя. Для контроля суммы переходных сопротивлений PE и PEN-проводников можно отслеживать уровень напряжения на корпусе электродвигателя относительно нулевой точки питающего трансформатора.

Литература

References

1. Левачёв А.В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток : дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2002. 167 с.
2. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 240 с.
3. Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Раевский И.П. Физика активных диэлектриков; под ред. В.П. Сахненко. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2009. 480 с.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. № 6 от 13.01.03. Ростов-н/Д.: Изд-во «Феникс», 2004. 320 с.
5. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2010. 464 с.
6. Савицкий Л.В. Способ повышения уровня электробезопасности в трехфазных электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью // Вестник ЗабГУ. 2013. № 04 (95). С. 84-88.
7. Среда создания инженерных приложений SIMULINK; под ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.
8. Техника высоких напряжений; под ред. Д.В. Разевига. М.: Энергия, 1976. 488 с.
9. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2009. 181 с.
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Электропроводность изоляции // Электротехнический портал Proelectro. Режим доступа: <http://www.proelectro.ru/lib/kabel/7.html>.
1. Levachyov A.V. *Diagnostics of isolation of asynchronous electric motors on the basis of parameters use of an equivalent circuit of windings* [Diagnostics of isolation of asynchronous electric motors on the basis of parameters use of an equivalent circuit of windings] dis. ... candidate of technical sciences. Barnaul, 2002. 167 p.
2. Lihachev V.L. *Spravochnik obmotchika asinhronnykh elektrodvigateley* [Directory of asynchronous electric motors spinner]. M: SOLON-the Press, 2004. 240 p.
3. Poplavko Yu. M., Pereverseva L.P. *Fizika aktivnykh diyelektrikov* [Physics of active dielectrics]. Rostov: YuFU publishing house, 2009. 480 p.
4. *Pravila tehniceskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley* [User's Rules for operating electrical equipment]. № 6 of 13.01.03. Rostov: publishing house «Phoenix», 2004. 320 p.
5. *Pravila ustroystva elektroustanovok: Vse deystvuyushhie razdely PUJe-6 i PUJe-7* [Rules for electro-equipment installation: All existing sections of PUE-6 and PUE-7]. Novosibirsk: Sib. univ. publishing house, 2010. 464 p.
6. Savitsky L.V. *Vestnik ZABGU* (Bulletin of ZabGU). 2013. No. 04 (95). Pp. 84-88.
7. *Sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy SIMULINK* [SIMULINK: environment of engineering appendices creation]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2003. 496 p.
8. *Tehnika vysokih napryazheniy* [Equipment of high tension]. Moscow: Energy, 1976. 488 p.
9. Tonkih V.G. *Method of asynchronous electric motors diagnostics in agriculture on the basis of the parameters analysis of their external magnetic field* [Metod diagnostiki asinhronnykh elektrodvigateley v selskom hozyaystve na osnove analiza parametrov ih vneshnego magnitnogo polya]: dis. ... candidate of technical sciences. Barnaul, 2009. 181 p.
10. Chernykh I.V., *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electro-technical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. St. Petersburg, 2008. 288 p.
11. *Elektroprovodnost izolyatsii* (Conductivity of isolation) Available at: <http://www.proelectro.ru/lib/kabel/7.html> (accessed 13 June 2013).

Коротко об авторе _____ **Briefly about the author**

Горбунов Р.В., аспирант, каф. «Электроэнергетика и электротехника», Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия
rom4264@yandex.ru

R. Gorbunov, postgraduate, Power Industry and Electrical Engineering department, Transbaikal State University, Chita, Russia

Научные интересы: диагностика асинхронных электродвигателей, автоматизация промышленных предприятий

Scientific interests: diagnostics of asynchronous electric motors, automation industrial enterprise

