

УДК 621.313.333

Оптимизация виброшумовых показателей многофазного синхронного электропривода на базе двигателя с постоянными магнитами

А.Н. Голубев, В.А. Мартынов, В.Д. Карачев
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zav@toe.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Задача снижения уровня шумов и вибраций в современном синхронном электроприводе на фоне постоянно ужесточающихся требований к эксплуатационным характеристикам приобретает особую актуальность. В отдельных технических отраслях, например в подводном флоте, улучшение виброакустических характеристик носит доминирующий характер. Существующие методы частотного регулирования не учитывают возможности влияния на виброшумовые характеристики, связанные с изменением числа фаз статора, а широко распространенные конструктивные способы ухудшают другие показатели привода, в частности скос пазов. Применение распределенных обмоток и увеличение величины воздушного зазора ослабляют поле машины и ухудшают ее энергетические характеристики. Большинство методов не учитывают специфику конкретной геометрии машины либо требуют достаточно долгих и объемных вычислительных операций. В связи с этим необходимо создание методики оптимизации виброшумовых характеристик двигателей с учетом реальной конфигурации магнитного поля в них.

Материалы и методы: Использованы методы численного интегрирования и метод конечных элементов в оболочке ElCut, позволяющий создавать и анализировать полевые модели двигателей с учетом нелинейной характеристики насыщения материалов.

Результаты: Предложена методика оптимизации магнитных сил, основанная на конструктивном изменении формы ротора машины и синтезе фазного тока статора специальной формы. Путем сравнительного анализа полевых моделей установлено двукратное снижение величины радиальных сил в результате предложенной оптимизации.

Выводы: Результаты исследования полностью согласуются с работами в области асинхронных многофазных приводов, аналогичные полевые модели которых имеют экспериментальное подтверждение. Разработанная методика формирования магнитного состояния электромеханической системы позволяет оптимизировать величины магнитных сил машины, что значительно снижает определяемые ими шумы и вибрации.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный двигатель, виброшумовые характеристики, магнитные силы.

Optimization of vibronoise characteristics of multiphase synchronous electrical drives based on a permanent magnet motor

A.N. Golubev, V.A. Martynov, V.D. Karachev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zav@toe.ispu.ru

Abstract

Background: The objective of reducing noise and vibrations in modern synchronous drives becomes more and more relevant in view of increasingly stringent performance requirements. Improving the vibro-acoustic performance in certain technical fields such as submarine fleet is of primary importance. The existing methods of frequency regulation do not take into account the influence of stator phase number on vibrating characteristics, and the widespread constructive ways degrade other characteristics of the drive, for example, the slant grooves. Distributed windings and air gap increase weaken the machine field and reduce its energy characteristics. Most of the methods do not take into account the specifics of particular machine geometry, or require rather long and bulky computing operations. In this regard, it is necessary to create methods of optimizing vibronoise characteristics of motors taking into consideration the actual configuration of their magnetic field.

Materials and Methods: The study employed methods of numerical integration and finite element method in the software shell Elcut enabling the development and analysis of engine field models taking account of nonlinear saturation characteristics of the materials.

Results: A magnetic force optimization technique has been suggested based on the structural change of the machine rotor form and synthesis of phase current of a special shape stator. Comparative analysis of the model field patterns has revealed a two-fold drop in radial force magnitude after optimization.

Conclusions: The results of the study are fully consistent with the works in the field of multi-phase asynchronous drives which describe experimental confirmation of analogous field models. The developed methods of forming the magnetic state of an electromechanical system allows optimizing the magnitude of machine magnetic forces, which significantly reduces noise and vibration.

Key words: synchronous electric drive, multiphase drive, vibronoise characteristics, magnetic forces.

Введение. Одним из актуальных вопросов современного электропривода остается шум электрических машин, возбуждаемый источниками магнитного происхождения – магнитными силами, действующими в воздушном зазоре. Эти силы могут быть разделены на тангенциальные, вызывающие пульсации электромагнитного момента, и радиальные, являющиеся причиной деформации статорного кольца [1, 2, 3]. Данные факторы приводят к появлению вибраций, вызывающих повышенные механические напряжения отдельных частей машины и приводящих к ее преждевременному выходу из строя. Другая техническая причина – применение синхронных приводов в специальных системах, требующих обеспечения минимума излучаемого акустического шума в целях обеспечения скрытности. Актуальной является и задача уменьшения негативно влияния привода на человеческий организм. Так, согласно [4], в общем случае это влияние может сказываться как на функциональном состоянии человека, приводящем к снижению качества работы, так и на общем физическом состоянии, выражаясь в появлении профессиональных хронических заболеваний, в том числе виброболезни.

Увеличение числа фаз статорной обмотки позволяет не только улучшить основные технико-экономические показатели машины [5, 6, 7], но и эффективно бороться с обозначенной проблемой за счет возможности целенаправленного воздействия на конфигурацию магнитного поля синхронного двигателя (СД).

Магнитные силы. Переход к многофазному исполнению позволяет снизить уровень шумов и вибраций двигателя за счет уменьшения тангенциальных сил. Это связано с тем, что происходит разрежение спектрального состава поля в воздушном зазоре путем устранения из него асинхронных гармоник при относительном возрастании синхронных [1].

Другая причина возникновения вибраций – действующая в любой точке воздушного зазора радиальная магнитная сила, величина которой пропорциональна квадрату индукции:

$$\rho(\alpha) = \frac{1}{2\mu_0} B^2(\alpha) = \frac{1}{2\mu_0} (B_s(\alpha) + B_r(\alpha))^2 = \\ = \frac{1}{2\mu_0} (B_s^2(\alpha) + B_r^2(\alpha) + 2B_s(\alpha)B_r(\alpha)),$$

где B_s и B_r – магнитная индукция от статорной обмотки и ротора соответственно.

Наиболее благоприятной формой распределения индукции с точки зрения снижения радиальных сил является трапецеидальная, характеризующая отсутствие промежуточных уровней индукции и, следовательно, перепадов уровня радиальной силы.

Выражения $B_s(\alpha)$ и $B_r(\alpha)$ относительно просто могут быть определены для упрощен-

ного представления машины с круглым ротором и гладким статором, т.е. для случая равномерного воздушного зазора. Тогда, рассматривая отдельные слагаемые в выражении расчета радиальной силы, можно получить выражения продольной и поперечной составляющих второй и четвертой гармоник радиальной силы – основных источников шума [8, 9, 10]. При этом

$$I_s^2 = \frac{1}{2} \sum_{v=1,3}^{v<m} (I_{sq(v)}^2 + I_{sd(v)}^2),$$

где I_s^2 – квадрат действующего значения тока статора;

$$M = \frac{m}{2} p \sum_{v=1,3}^{v<m} v i_f' L_{m(v)} I_{sq(v)},$$

где M – электромагнитный момент.

Далее ставится задача компромиссной минимизации действующего значения тока статора при сохранении требуемого значения момента:

$$F = P_{2d}^2 + P_{2d}^2 + \frac{\phi}{1-\phi} \frac{B_m^2}{\delta^2} I_{sd(1)}^2 = \min,$$

где P_2 – магнитная сила второго порядка.

Из этого выражения путем соответствующих преобразований и введения вспомогательных переменных можно получить следующие выражения для поперечных и продольных составляющих приведенных векторов тока статора:

$$I_{sq(v)} = \frac{2M}{mZ_p} \frac{v i_f' L_{m(v)}}{\sum_{\mu=1,3}^{\mu<m} (\mu \cdot i_f' L_{m(\mu)})};$$

$$I_{sd(1)} = \sqrt[3]{\sqrt{p^3 + q^2} - q} - \sqrt[3]{\sqrt{p^3 + q^2} + q} - \frac{b}{2a},$$

где a , b , p и q – некоторые алгебраические функции индукции магнита ротора и конструктивных параметров СДПМ [1].

Учитывая специфику многофазного СД как объекта управления, полученные соотношения вводятся в многоканальную САУ, обеспечивая снижение радиальной силы при сохранении высоких энергетических показателей системы. Такой подход позволил добиться двукратного снижения величины радиальной силы 9-фазного СД при сохранении основных эксплуатационных характеристик [1]. Описанный способ функционального представления пространственного распределения индукции не учитывает нелинейный характер насыщения материалов машины и ограничен самыми простыми формами статора и ротора. Однако в силу особенностей машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов [11, 12], в этой области описанный метод может эффективно применяться.

Материалы и методы. Наиболее точное определение величин B_s и B_r для анализа распределения магнитной индукции вдоль рачотки магнитопровода любой конфигурации можно получить, используя современные программные комплексы, базирующиеся на методе конечных элементов. Одной из таких программ является отечественная EICut, позволяющая достаточно удобно на основе встроенных инструментов рассчитывать реальную конфигурацию электромагнитного поля в активных частях машины.

Оценка величины радиальной силы при использовании EICut осуществлялась по следующему алгоритму:

1. Построение реальной геометрии машины в виде сечения с указанием отдельных конструктивных частей и их свойств (магнитные свойства материалов, источники полей). Учет активной длины машины осуществляется заданием соответствующего параметра в свойствах задачи.

2. Выделение зубцов статора в виде отдельных блоков и создание скрипта перерасчета пндемоторной силы в радиальную отдельного зубца.

3. Построение кривой зависимости полученной радиальной силы от условного номера зубца.

Таким образом, для текущего квазистационарного состояния машины может быть получена картина распределения радиальных сил по зубцам статора. Оптимизация этого распределения осуществляется как за счет изменения геометрии машины, так и за счет изменения токов в обмотках статора. Лучшего результата удалось добиться комбинацией указанных подходов.

Численные эксперименты показывают, что основной вклад в формирование поля в зазоре и, следовательно, величины радиальной силы вносят постоянные магниты ротора (рис. 1). При этом меньший уровень радиальной силы соответствует криволинейной форме ротора, обеспечивающей неравномерный воздушный зазор вдоль полюса магнита. Наилучший результат соответствует форме ротора, при которой радиус кривизны полюсов увеличен на 30 %, что для гладкого исполнения статора обеспечивает трапецевидальное распределение индукции. Форма такого ротора и реальная картина индукции в зазоре машины приведены на рис. 2.

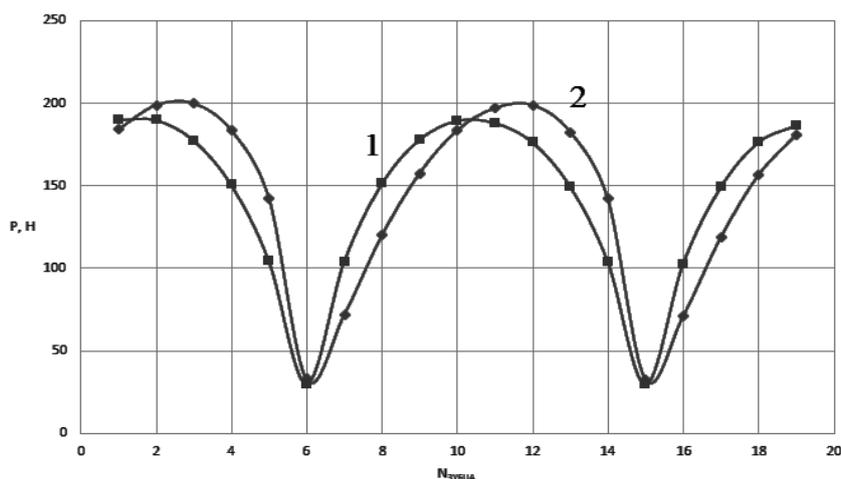


Рис. 1. Распределение радиальных сил по зубцам статора: 1 – магниты ротора являются единственным источником поля; 2 – дополнительно задействована статорная обмотка

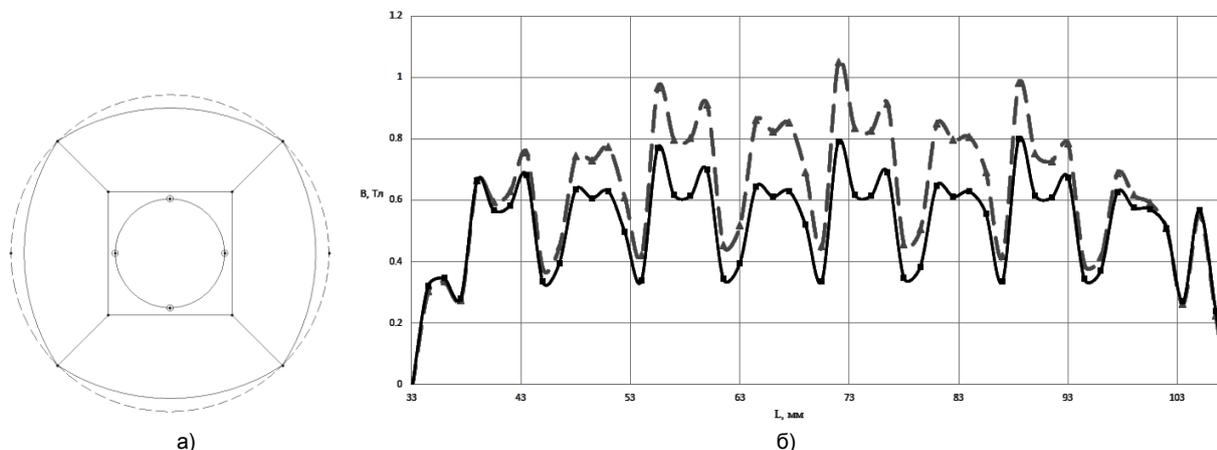


Рис. 2. Форма ротора, обеспечивающая снижение величины радиальных сил (а) и реальное распределение индукции на один полюс магнита (б) (пунктирные линии относятся к круглому исполнению ротора)

Еще большее снижение величины радиальных сил может быть достигнуто за счет синтеза фазного тока статора оптимального гармонического состава. Для этого задача с новой геометрией ротора и синусоидальным распределением токов подвергается итерационным перерасчетам, основанным на последовательном изменении величины тока каждой фазы. Критерием перехода к следующей фазе является невозможность дальнейшего уменьшения площади под заданной в пределах периода кривой распределения радиальных сил при фиксированном пороговом значении электромагнитного момента. После пересчета тока последней обмотки (для 9-фазного исполнения двигателя – 9-й) из полученных значений формируется дискретное представление фазного тока с шагом в $(360^\circ/(2\cdot m)) = 20^\circ$. Сформированный массив подвергается дискретному преобразованию Фурье, в результате которого выделяются токовые гармоники с порядковым номером, меньшим числа фаз. По найденным значениям составляющих рассчитывается искомая кривая изменения фазного тока статора, определяющая наименьшее значение радиальных сил.

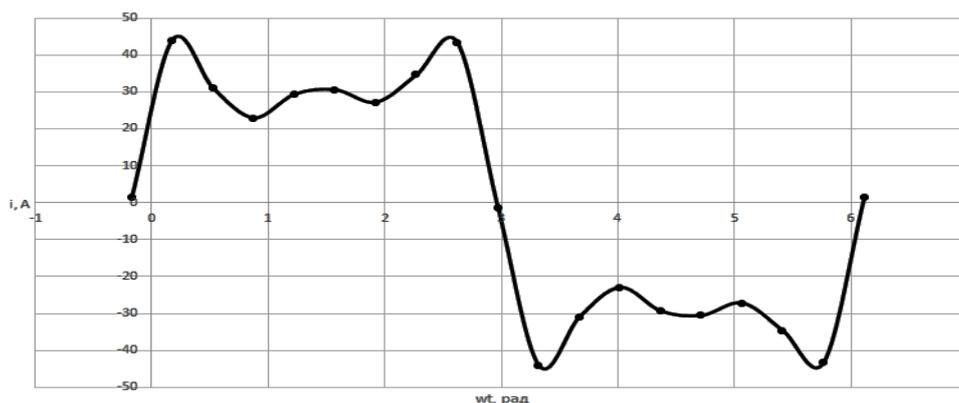


Рис. 3. Кривая оптимизированного фазного тока

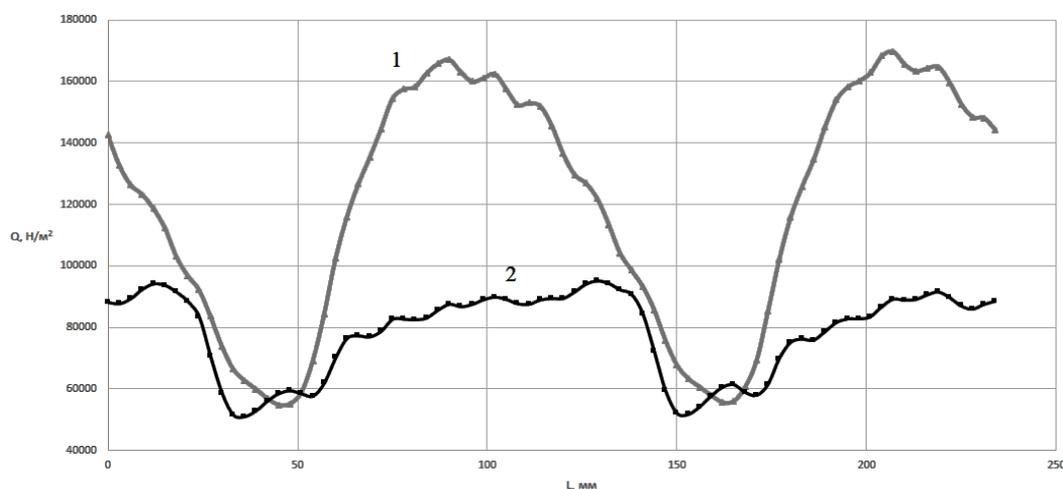


Рис. 4. Сравнительные характеристики распределения механических напряжений: 1 – до оптимизации; 2 – после комплексной оптимизации

Результаты исследования. В качестве иллюстрации результатов предложенной оптимизации на рис. 3 показана расчетная кривая фазного тока $i(\omega t)$. На рис. 4 приведено сравнение картины распределения механических напряжений вдоль внешней поверхности статорного кольца для 9-фазного СД с постоянными магнитами ($P_n = 2,5$ кВт, $\omega_n = 157$ рад/с): 1 – с питанием токами синусоидальной формы и круглым ротором; 2 – с питанием токами оптимизированной формы и ротором, изображенным на рис. 2.

Следует отметить, что само по себе увеличение числа фаз практически не влияет на уровень радиальных сил, оно лишь открывает возможность более глубокого и качественного воздействия на конфигурацию поля машины, определяющую эти силы. Поэтому улучшение виброшумовых характеристик многофазного ЭП базируется на формировании питающих воздействий специальной, отличающейся от синусоидальной, формы.

Выводы. Предложенный метод снижения магнитных сил в воздушном зазоре СД является основой для улучшения виброшумовых показателей многофазного синхронного электропривода.

Список литературы

1. **Оптимизация** виброшумовых характеристик синхронного электропривода / А.Н. Голубев, С.С. Ананьев, В.А. Мартынов, В.Д. Карачев // *Электричество*. – 2015. – № 2. – С. 49–53.
2. **Геллер Б., Гамата В.** Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
3. **Gieras J., Wang C., Lai J.** Noise of polyphase electric motors. – Boca Raton: CRC Press, 2005. – 360 p.
4. **Барановский В.В., Колосов Ю.В.** Защита от вибрации и шума на производстве: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 38 с.
5. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
6. **Голубев А.Н., Лапин А.А.** Многофазный синхронный электропривод // *Электричество*. – 2005. – № 2. – С. 43–47.
7. **Балагуров В.А.** Проектирование специальных электрических машин переменного тока. – М.: Высш. шк., 1982 г. – 272 с.
8. **Вибрация и шум** электрических машин малой мощности / Л.К. Волков, Р.Н. Ковалев, Г.Н. Никифорова и др. – Л.: Энергия, 1979. – 206 с.
9. **Шубов И.Г.** Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
10. **Radu S. Curiac, Sumit Singhal.** Magnetic noise in induction motors. American Society of Mechanical Engineers, Noise Control and Acoustics Division (Publication) NCAD 08/2002; DOI: 10.1115/NCAD2008-73077.
11. **Лифанов В.А.** Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. – 164 с.
12. **Методы** проектирования маломощных электрических машин / В.А. Воронкин, В.Я. Геча, Э.А. Городецкий и др. // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. – 2006. – Т. 103.
2. **Geller, B., Gamata, V.** *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics of induction machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p.
3. **Gieras, J., Wang, C., Lai, J.** Noise of polyphase electric motors. Boca Raton, CRC Press, 2005. 360 p.
4. **Baranovsky, V.V., Kolosov, Yu.V.** *Zashchita ot vibratsii i shuma na proizvodstve* [Protection against vibration and noise at industrial enterprises: a study guide]. Saint-Petersburg, SPbGU ITMO, 2011. 38 p.
5. **Ivanov-Smolensky, A.V.** *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and energy transformation in electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989. 312 p.
6. **Golubev, A.N., Lapin, A.A.** *Mnogofaznyy sinkhronnyy elektroprivod* [Polyphase synchronous electric drive]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 2, pp. 43–47.
7. **Balagurov, V.A.** *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Designing of special electrical AC machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 272 p.
8. **Volkov, L.K., Kovalev, R.N., Nikiforova, G.N., Chaadaeva, E.E., Yavlenskiy, K.N., Yavlenskiy, A.K.** *Vibratsiya i shum elektricheskikh mashin maloy moshchnosti* [Vibration and noise of low-power electrical machines]. Leningrad, Energiya, 1979. 206 p.
9. **Shubov, I.G.** *Shum i vibratsiya elektricheskikh mashin* [Noise and vibration of electrical machines]. Leningrad, Energoatomizdat, 1986. 208 p.
10. **Radu, S. Curiac, Sumit, Singhal.** Magnetic noise in induction motors. American Society of Mechanical Engineers, Noise Control and Acoustics Division (Publication) NCAD 08/2002; DOI: 10.1115/NCAD2008-73077.
11. **Lifanov, V.A.** *Raschet elektricheskikh mashin maloy moshchnosti s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnetov: uchebnoe posobie* [Analysis of low-power electrical machines with permanent magnet excitation: a study guide]. Chelyabinsk: Izdatel'skiy tsentr YuUrGU, 2010. 164 p.
12. **Voronkin, V.A., Gecha, V.Ya., Gorodetskiy, E.A., Evlanov, V.V., Zakharenko, A.B., Zubrenkov, B.I., Kaplin, A.I., Ledovskoy, V.I., Sklyarova, I.V., Smirnova, L.P., Shapiro, M.X.** *Metody proektirovaniya maloshumnykh elektricheskikh mashin* [Methods of low-noise electrical machines design]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEEM*, 2006, vol. 103.

References

1. Golubev, A.N., Ananyev, S.S., Martynov, V.A., Karachev, V.D. Optimizatsiya vibroshumovykh kharakteristik sinkhronnogo elektroprivoda [Optimisation of synchronous drive vibronoise characteristics]. *Elektrichestvo*, 2015, no. 2, pp. 49–53.

Голубев Александр Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
телефон (4932) 26-99-03,
e-mail: alenikgo@yandex.ru

Мартынов Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, зав. кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологий,
телефон (4932) 26-99-08,
e-mail: zav@toe.ispu.ru

Карачев Валерий Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
телефон (4932) 26-99-03,
e-mail: karvaldm@mail.ru