

УДК 621.3.026.5

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.04

И.П. Попов

Курганский государственный университет, Курган, Россия

СВОЙСТВО СЕТИ ПО САМОКОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Реактивная мощность в сети является нежелательным явлением. Ее циркуляция по проводам вызывает тепловые потери в объеме примерно 10 % от ее величины. Для ее снижения используются дорогостоящие статические и динамические компенсаторы. **Цель исследования:** оценка влияния каскада трансформаторов на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке. **Методы:** в настоящей работе применяются электротехнические расчеты. Рассматривается существенно идеализированная схема подключения вторичных обмоток трансформатора к симметричной индуктивной нагрузке. Активные составляющие сопротивлений не рассматриваются. Вращающееся магнитное поле создается первичными обмотками (не показаны). Реактивная мощность в сеть не передается (гипотетически). **Результаты:** установлено, что при оговоренных условиях любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз. И наоборот, любые две фазы являются источником реактивной мощности для третьей фазы. Таким образом, для рассмотренной схемы (внешняя сеть отключена) при симметричной нагрузке происходит самокомпенсация реактивной мощности. Каскад трансформаторов представлен их упрощенными схемами замещения (без учета рассеяний). Активные сопротивления не рассматриваются. Идеализация этой схемы меньше, чем первой, поскольку реактивная мощность второго и третьего трансформаторов передается в первичную обмотку. Если трансформаторы идентичны, то поток реактивной мощности от нагрузки делится между ними на равные части. Поэтому поток реактивной мощности на внешнем участке в три раза меньше, чем на внутреннем. В соответствии с этим в реальной сети с ростом числа трансформаторных подстанций поток реактивной мощности по мере удаления от нагрузки существенно уменьшается. **Практическая значимость:** результаты могут быть полезны при разработке средств компенсации реактивной мощности в сетях.

Ключевые слова: реактивная мощность, самокомпенсация, симметричная нагрузка, каскад трансформаторов.

I.P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russian Federation

PROPERTIES OF THE NETWORK FOR SELF-COMPENSATION OF THE REACTIVE POWER

Reactive power in the network is an undesirable phenomenon. Its circulation through the wires causes heat losses in the volume of about 10 % of its value. To reduce it, expensive static and dynamic compensators are used. **Purpose of the study:** to assess the effect of a cascade of transformers on reactive power in the network with a symmetrical load. **Methods:** in this work, electrical calculations are used. A substantially idealized circuit for connecting the secondary windings of a transformer to a sym-

metrical inductive load is considered. Active components of resistances are not considered. The rotating magnetic field is generated by primary windings (not shown). Reactive power is not transmitted to the network (hypothetically). **Results:** It was found that under the specified conditions, any phase is a source of reactive power of the other two phases. Conversely, any two phases are the source of the third phase reactive power. Thus, for the considered circuit (the external network is disconnected) with a symmetrical load, reactive power self-compensation occurs. A cascade of transformers is represented by their simplified equivalent circuits (excluding scattering). Active resistances are not considered. The idealization of this circuit is less than the first, since the reactive power of the second and third transformers is transferred to the primary winding. If the transformers are identical, then the reactive power flow from the load is divided between them into equal parts. Therefore, the flow of reactive power in the outer section is three times less than in the inner section. In accordance with this, in a real network, with an increase in the number of transformer substations, the flow of reactive power decreases significantly with distance from the load. **Practical significance:** the results can be useful in the development of means for reactive power compensation in networks.

Keywords: reactive power, self-compensation, symmetrical load, transformer cascade.

Реактивная мощность в сети является нежелательным явлением [1–5]. Ее циркуляция по проводам вызывает тепловые потери в объеме, примерно, 10 % ее величины. Это в совокупности с тем, что наличие реактивной мощности в сети приводит к снижению коэффициента мощности, создает серьезную *научную проблему*.

В качестве анализа существующих решений в данной области можно указать продольную и поперечную компенсацию реактивной мощности с использованием статических и динамических компенсаторов, включая батареи конденсаторов и синхронные компенсаторы [6–9].

Недостатками существующих мероприятий по снижению реактивной мощности являются их искусственность и высокая стоимость.

Целью работы является оценка влияния каскада трансформаторов на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке. При этом речь идет об имеющихся в сети трансформаторах, а не специально (искусственно) установленных для борьбы с реактивной мощностью, что не предполагает дополнительных расходов для достижения этой цели.

Задачи исследования состоят в качественном и аналитическом описании процессов самокомпенсации реактивной мощности в каскаде трансформаторов.

Методы исследования. В настоящей работе применяются электротехнические расчеты.

Самокомпенсация реактивной мощности при симметричной нагрузке

На рис. 1 представлена существенно идеализированная схема подключения вторичных обмоток трансформатора к симметричной индуктивной нагрузке. Сопротивления рассеяния не показаны [10].

Активные составляющие сопротивлений не рассматриваются. Магнитное поле создается первичными обмотками (не показаны). Реактивная мощность в сеть не передается (гипотетически).

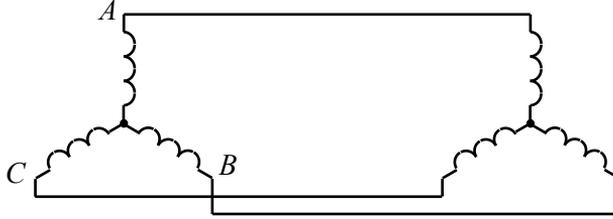


Рис. 1. Самокомпенсация реактивной мощности

В части магнитного поля и опосредованного взаимодействия его с нагрузкой схема не отличима от рассмотренной в [11, 12], в которой вместо трансформатора использована синхронная явнополюсная машина [13–16] и в которой источником возбуждения колебаний тока (индуктивного) в любой фазе являются другие (другая) фазы (фаза) нагрузки.

Подобное явление самокомпенсации реактивной мощности известно и в механических системах [17–19].

Мгновенные токи, напряжения и мощности (реактивные) фаз соответственно равны:

$$i_A = I \sin \omega t, \quad u_A = I \omega L \cos \omega t, \quad q_A = I^2 \omega L \sin \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} I \omega L \sin 2 \omega t,$$

$$i_B = I \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad u_B = I \omega L \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right), \quad q_B = \frac{1}{2} I^2 \omega L \sin \left(2 \omega t - \frac{4\pi}{3} \right),$$

$$i_C = I \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right), \quad u_C = I \omega L \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right), \quad q_C = \frac{1}{2} I^2 \omega L \sin \left(2 \omega t + \frac{4\pi}{3} \right).$$

где L – суммарная индуктивность фазы трансформатора (включая рассеяние) и нагрузки.

Сумма мощностей фаз B и C определяется как

$$q_{BC} = q_B + q_C = \frac{1}{2} I \omega L \sin \left(2 \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \frac{1}{2} I \omega L \sin \left(2 \omega t + \frac{4\pi}{3} \right) =$$

$$= 2 \frac{1}{2} I \omega L \sin \frac{2 \omega t - 4\pi/3 + 2 \omega t + 4\pi/3}{2} \cos \frac{2 \omega t - 4\pi/3 - 2 \omega t - 4\pi/3}{2} =$$

$$= 2 \frac{1}{2} I \omega L \sin 2 \omega t \cos \left(-\frac{4\pi}{3} \right) = -\frac{1}{2} I \omega L \sin 2 \omega t.$$

Эта величина противоположна мощности фазы A : $q_B + q_C = -q_A$.

Это означает, что при оговоренных условиях любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз, и, наоборот, любые две фазы являются источником реактивной мощности третьей фазы. Таким образом, для данной схемы при симметричной нагрузке происходит самокомпенсация реактивной мощности.

Замечание о мощностях фаз

Для того чтобы последняя формула не создавала впечатления, что мощность в любом случае удовлетворяет аналогу первого закона Кирхгофа, ниже приводятся выражения для мгновенных активных мощностей фаз и их соотношение:

$$\begin{aligned}
 p_A &= I^2 \omega L \cos^2 \omega t = I^2 \omega L \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} = \frac{1}{2} I^2 \omega L + \frac{1}{2} I^2 \omega L \cos 2\omega t, \\
 p_B &= \frac{1}{2} I^2 \omega L + \frac{1}{2} I^2 \omega L \cos \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right), \\
 p_C &= \frac{1}{2} I^2 \omega L + \frac{1}{2} I^2 \omega L \cos \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right), \\
 p_B + p_C &= \frac{1}{2} I^2 \omega L + \frac{1}{2} I^2 \omega L \cos \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \frac{1}{2} I^2 \omega L + \\
 &\quad + \frac{1}{2} I^2 \omega L \cos \left(2\omega t + \frac{4\pi}{3} \right) = \\
 &= I^2 \omega L + \frac{1}{2} I^2 \omega L \left(\cos 2\omega t \cos \frac{4\pi}{3} + \sin 2\omega t \sin \frac{4\pi}{3} \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{2} I^2 \omega L \left(\cos 2\omega t \cos \frac{4\pi}{3} - \sin 2\omega t \sin \frac{4\pi}{3} \right) = \\
 &= I^2 \omega L - \frac{1}{2} I^2 \omega L \frac{1}{2} \cos 2\omega t - \frac{1}{2} I^2 \omega L \frac{1}{2} \cos 2\omega t = I^2 \omega L - \frac{1}{2} I^2 \omega L \cos 2\omega t, \\
 p_B + p_C &\neq -p_A.
 \end{aligned}$$

Потоки реактивной мощности в каскаде трансформаторов

Каскад трансформаторов на рис. 2 представлен их упрощенными схемами замещения (без учета рассеяний). Активные сопротивления не рассматриваются.

Идеализация этой схемы меньше, чем первой, поскольку реактивная мощность второго и третьего трансформаторов *передается* в первичную обмотку.

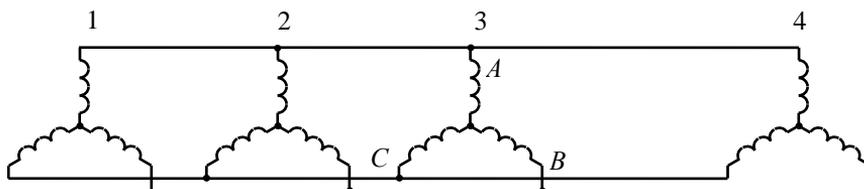


Рис. 2. Каскад трансформаторов

Если трансформаторы идентичны, то поток реактивной мощности от нагрузки делится между ними на равные части.

Поэтому поток реактивной мощности на участке 1–2 в три раза меньше, чем на участке 3–4.

Предпосылки настоящего исследования

Известны два основных вида колебаний. Первое обусловлено взаимным преобразованием кинетической энергии груза в потенциальную энергию пружины, второе – энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора.

Относительно недавно описаны осцилляторы с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию магнитного поля [20] с собственной частотой колебаний;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{y}{mL}},$$

где y – параметрический коэффициент или с взаимным преобразованием кинетической энергии груза в энергию электрического поля [21] с собственной частотой колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{y}{mC}},$$

а также осцилляторы с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию электрического поля [22] с собственной частотой колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{yC}},$$

или с взаимным преобразованием потенциальной энергии пружины в энергию магнитного поля [23] с собственной частотой колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{yL}}.$$

Почти сразу возник вопрос, а нельзя ли создать осцилляторы с взаимным преобразованием кинетической энергии в кинетическую же энергию другого груза? Или колебания с взаимным преобразованием энергии магнитного поля в энергию магнитного же поля другой катушки?

Такие решения были найдены [11, 12, 17–19]. В частности, для монореактивной индуктивной системы схема представлена на рис. 3.

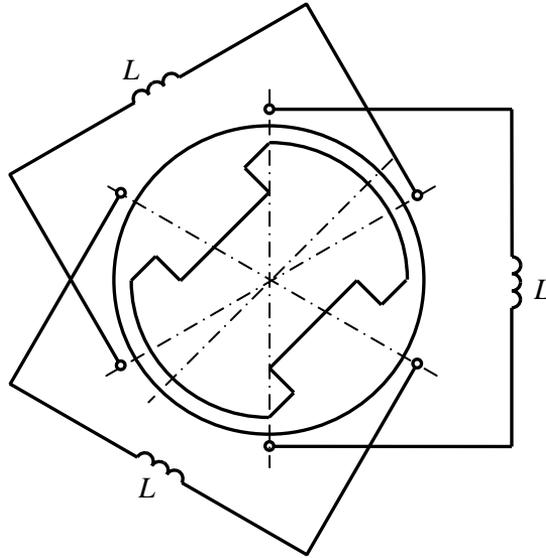


Рис. 3. Модель *LLL*-осциллятора

Электрические уравнения *LLL*-осциллятора:

$$B \ln R \frac{d\varphi}{dt} \cos \varphi = L \frac{di_1}{dt}, \quad B \ln R \frac{d\varphi}{dt} \cos \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) = L \frac{di_2}{dt},$$

$$B \ln R \frac{d\varphi}{dt} \cos \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) = L \frac{di_3}{dt}.$$

Отсюда

$$i_1 = -\frac{B \ln R}{L} \sin \varphi, \quad i_2 = \frac{B \ln R}{L} \sin \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right), \quad i_3 = \frac{B \ln R}{L} \sin \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right).$$

Механический момент равен

$$\begin{aligned}
 & Blni_1R \cos \varphi + Blni_2R \cos \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) + Blni_3R \cos \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) = \\
 & = -Bln \frac{BlnR}{L} \sin \varphi R \cos \varphi + Bln \frac{BlnR}{L} \sin \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) R \cos \left(\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) + \\
 & \quad + Bln \frac{BlnR}{L} \sin \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) R \cos \left(-\frac{2}{3} \pi - \varphi \right) = \\
 & = -\frac{(BlnR)^2}{2L} \sin 2\varphi + \frac{(BlnR)^2}{2L} \sin \left(\frac{4}{3} \pi - 2\varphi \right) + \frac{(BlnR)^2}{2L} \sin \left(-\frac{4}{3} \pi - 2\varphi \right) = \\
 & = -\frac{(BlnR)^2}{2L} \sin 2\varphi + \frac{(BlnR)^2}{2L} \left(\sin \frac{4}{3} \pi \cos 2\varphi - \cos \frac{4}{3} \pi \sin 2\varphi \right) + \\
 & \quad + \frac{(BlnR)^2}{2L} \left(-\sin \frac{4}{3} \pi \cos 2\varphi - \cos \frac{4}{3} \pi \sin 2\varphi \right) = 0.
 \end{aligned}$$

Поэтому

$$\varphi = \omega_0 t.$$

Следовательно,

$$i_1 = -\frac{BlnR}{L} \sin \omega_0 t, \quad i_2 = \frac{BlnR}{L} \sin \left(\frac{2}{3} \pi - \omega_0 t \right), \quad i_3 = \frac{BlnR}{L} \sin \left(-\frac{2}{3} \pi - \omega_0 t \right).$$

Таким образом, в *LLL*-осцилляторе происходят свободные колебания тока (без питания извне). Это значит, что любая фаза является источником реактивной мощности двух других фаз.

Это обстоятельство создает предпосылку снижения потока реактивной мощности в сети за счет взаимной компенсации реактивной мощности фаз. Другими словами, фазы симметричной нагрузки могут обмениваться реактивной мощностью между собой, а не с сетью.

В качестве технических средств, обеспечивающих этот реактивный энергообмен, могут выступать уже имеющиеся в сети каскады трансформаторов и шунтирующих реакторов. В этом смысле достигаемое таким образом снижение потока реактивной мощности является естественным, т.е. не специально организованным, как в случае с синхронными компенсаторами и конденсаторами.

Заключение

В соответствии с изложенным в реальной сети с ростом числа трансформаторных подстанций [24, 25] поток реактивной мощности по мере удаления от нагрузки существенно уменьшается за счет взаимной компенсации реактивной мощности фаз.

Научная новизна заключается в том, что каскады трансформаторов и шунтирующих реакторов существенно влияют на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке, обуславливая ее естественное снижение.

В реальных условиях нагрузка в общем случае не является симметричной. При этом в соответствии с принципом суперпозиции умеренно несимметричную нагрузку можно представить в виде композиции симметричной и существенно несимметричной. В этом случае естественная самокомпенсация реактивной мощности будет происходить для симметричной составляющей нагрузки.

Практическая значимость статьи состоит в том, что ее результаты могут быть полезны при разработке средств компенсации реактивной мощности в сетях.

Библиографический список

1. Weckx S., Gonzalez C., Driesen J. Combined central and local active and reactive power control of pv inverters // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2014. – Vol. 5, no. 3. – P. 776–784.
2. Islam S.R., Sutanto D., Muttagi K.M. Coordinated decentralized control of emergency voltage and reactive power to prevent long-term voltage in the power system // IEEE Transactions on Power Systems. – 2015. – Vol. 30, no. 5. – P. 2591–2603.
3. The adaptive sliding mode reactive power control strategy for wind-diesel power system based on sliding mode observer / Y. Mi, Y. Fu, Y. Song, C. Wang // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2020. – Vol. 11, no. 4. – P. 2241–2251.
4. Malysheva N., Tretyakov E., Chernik K. Optimal choice of technical means for reactive power compensation // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. – 2019. – P. 8743085.

5. Мишуриных С.В., Петроченков А.Б. Методические рекомендации по оценке реактивной мощности, потребляемой погружным асинхронным электродвигателем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 2. – С. 175–194.

6. Анализ качества электроэнергии в распределительной сети Египта и выбор устройств компенсации реактивной мощности / В.Н. Тульский, М.А.Х. Толба, А.С. Ванин, А.А.З. Дияб // Электричество. – 2018. – № 2. – С. 52–58.

7. Малышева Н.Н., Третьяков Е.А. Моделирование группового управления напряжением с источниками активной и реактивной мощности в электрических сетях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 31. – С. 22–34.

8. Решение задачи оптимального распределения мощности индивидуальных компенсирующих устройств для группы асинхронных двигателей / Е.В. Тумаева, С.С. Кузин, И.Ф. Афлятунов, Т.Г. Макусева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 175–192.

9. Ромодин А.В., Лейзгольд К.А., Трушников К.П. Оптимизация выбора регулируемых компенсирующих установок для ОАО «УНИИКМ» // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 10. – С. 62–69.

10. Попов И.П. Емкостное сопротивление рассеяния обмотки трансформатора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 32. – С. 148–159.

11. Попов И.П. Свободные гармонические колебания в электрических системах с однородными реактивными элементами // Электричество. – 2013. – № 1. – С. 57–59.

12. Самонейтрализация индуктивной симметричной нагрузки в трехфазной сети / И.П. Попов, В.И. Чарыков., В.Г. Чумаков, С.С. Низавитин // АПК России. – 2015. – Т. 72. – № 2. – С. 87–90.

13. Попов И.П. Четыре теоремы для синхронных машин с реактивной нагрузкой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 169–178.

14. Момент синхронной электрической машины при реактивной нагрузке / И.П. Попов, Д.Н. Парышев, А.В. Ильтяков, О.Ю. Моисеев, В.В. Харин // Естественные и технические науки. – 2019. – № 7(133). – С. 129–132.

15. Мгновенное значение момента синхронной электрической машины при реактивной нагрузке / И.П. Попов, В.Г. Чумаков, С.С. Родионов, Л.Я. Чумакова // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сб. статей по материалам всерос. (нац.) науч.-практ. конф. – Курган: Изд-во Курган. ГСХА, 2021. – С. 354–358.

16. Попов И.П. Об одной теореме для синхронной электрической машины // Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.С. Мхитаряна. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2019. – С. 118–121.

17. Popov I.P. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 76, iss. 4. – P. 393–395. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.09.005

18. Popov I.P. Theory of a Multi-Inert Oscillator // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2020. – Vol. 49, no. 8. – P. 667–671. DOI: 10.3103/S1052618820080105

19. Попов И.П. Колебательные системы, состоящие только из инертных или только упругих элементов, и возникновение в них свободных гармонических колебаний // Вестник Томск. гос. ун-та. Математика и механика. – 2013. – № 1(21). – С. 95–103.

20. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Инертно-индуктивный осциллятор // Вестник Курган. гос. ун-та. Технические науки. – 2013. – Вып. 8. – № 2(29). – С. 80–81.

21. Попов И.П. Инертно-емкостная колебательная система // Зауральский научный вестник. – 2013. – № 2(4). – С. 65–66.

22. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Упруго-емкостные колебания в электромеханических системах // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сб. науч. трудов. – Екатеринбург. Изд-во УРФУ, 2014. – С. 217–218.

23. Попов И.П. Упруго-индуктивный осциллятор // Российский научный журнал. – 2013. – № 1 (32). – С. 269–270.

24. Исследование работы многофункциональных трансформаторов в качестве устройств обеспечения электромагнитной совместимости / Л.Э. Рогинская, А.Р. Латыпов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 21. – С. 36–48.

25. Сельменева Д.С., Лиске Е.Г., Шевцов Д.Е. Исследование переходных процессов при управляемом включении силового трансформатора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 24. – С. 161–177.

References

1. Weckx S., Gonzalez C., Driesen J. Combined central and local active and reactive power control of pv inverters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 776-784.

2. Islam S.R., Sutanto D., Muttagi K.M. Coordinated decentralized control of emergency voltage and reactive power to prevent long-term voltage in the power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, vol. 30, no. 5, pp. 2591-2603.

3. Mi Y., Fu Y., Song Y., Wang C. The adaptive sliding mode reactive power control strategy for wind-diesel power system based on sliding mode observer. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 2241-2251.

4. Malysheva N., Tretyakov E., Chernik K. Optimal choice of technical means for reactive power compensation. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019*, 2019, 8743085 p.

5. Mishurinskikh S.V., Petrochenkov A.B. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke reaktivnoi moshchnosti, potrebliaemoi pogruzhnym asinkhronnym elektrodvigatelem [Guidelines for assessing reactive power consumed by a submersible induction motor]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 2, pp. 175-194.

6. Tul'skii V.N., Tolba M.A.Kh., Vanin A.S., Diiab A.A.Z. Analiz kachestva elektroenergii v raspredelitel'noi seti Egipta i vybor ustroystv kompensatsii reaktivnoi moshchnosti [Analysis of the quality of electricity in the distribution network of Egypt and the choice of reactive power compensation devices]. *Elektrichestvo*, 2018, no. 2, pp. 52-58.

7. Malysheva N.N., Tret'iakov E.A. Modelirovanie gruppovogo upravleniia napriazheniem s istochnikami aktivnoi i reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setiakh [Modeling group voltage control with sources of active and reactive power in electrical networks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 31, pp. 22-34.

8. Tumaeva E.V., Kuzin S.S., Afliatunov I.F., Makuseva T.G. Reshenie zadachi optimal'nogo raspredeleniia moshchnosti individual'nykh kompensiruiushchikh ustroystv dlia gruppy asinkhronnykh dvigatelei [Solving the problem of optimal power distribution of individual compensating devices for a group of asynchronous motors]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 36, pp. 175-192.

9. Romodin A.V., Leizgol'd K.A., Trushnikov K.P. Optimizatsiia vybora reguliruemyykh kompensiruiushchikh ustanovok dlia OAO "UNIIKM" [Optimization of the selection of adjustable compensating units for JSC "UNIIKM"]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 10, pp. 62-69.

10. Popov I.P. Emkostnoe soprotivlenie rasseianiia obmotki transformatora [Leakage capacitance of the transformer winding]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 32, pp. 148-159.

11. Popov I.P. Svobodnye garmonicheskie kolebaniia v elektricheskikh sistemakh s odnorodnymi reaktivnymi elementami [Free harmonic oscillations in electrical systems with homogeneous reactive elements]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 1, pp. 57-59.

12. Popov I.P., Charykov V.I., Chumakov V.G., Nizavitin S.S. Samoneutralizatsiia induktivnoi simmetrichnoi nagruzki v trekhfaznoi seti [Self-neutralization of inductive symmetrical load in a three-phase network]. *APK Rossii*, 2015, vol. 72, no. 2, pp. 87-90.

13. Popov I.P. Chetyre teoremy dlia sinkhronnykh mashin s reaktivnoi nagruzkoii [Four theorems for reactive load synchronous machines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 28, pp. 169-178.

14. Popov I.P., Paryshev D.N., Il'tiakov A.V., Moiseev O.Iu., Kharin V.V. Moment sinkhronnoi elektricheskoi mashiny pri reaktivnoi nagruzke [The moment of a synchronous electric machine at reactive load]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 7(133), pp. 129-132.

15. Popov I.P., Chumakov V.G., Rodionov S.S., Chumakova L.Ia. Mgnovennoe znachenie momenta sinkhronnoi elektricheskoi mashiny pri reaktivnoi nagruzke [Instantaneous value of the moment of a synchronous electric machine under reactive load]. *Innovatsionnye tekhnologii v APK: teoriia i praktika: sb. statei po materialam vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kurgan: Kurganskaia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia imeni T.S. Mal'tseva, 2021, pp. 354-358.

16. Popov I.P. Ob odnoi teoreme dlia sinkhronnoi elektricheskoi mashiny [On a theorem for a synchronous electric machine]. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniiax. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ed. V.S. Mkhitariana. Magnitogorsk: Magnitogorskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni G.I. Nosova, 2019, pp. 118-121.

17. Popov I.P. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2012, vol. 76, iss. 4, pp. 393-395. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.09.005

18. Popov I.P. Theory of a Multi-Inert Oscillator. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2020, vol. 49, no. 8, pp. 667-671. DOI: 10.3103/S1052618820080105

19. Popov I.P. Kolebatel'nye sistemy, sostoiaushchie tol'ko iz inertnykh ili tol'ko uprugikh elementov, i vozniknovenie v nikh svobodnykh garmonicheskikh kolebaniï [Oscillatory systems consisting only of inert or only elastic elements, and the emergence of free harmonic oscillations in them]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2013, no. 1(21), pp. 95-103.

20. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Inertno-induktivnyi ostsilliator [Inert-inductive oscillator]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, iss. 8, no. 2 (29), pp. 80-81.

21. Popov I.P. Inertno-emkostnaia kolebatel'naia sistema [Inert-capacitive oscillatory system]. *Zaural'skii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 2 (4), pp. 65-66.

22. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Uprugo-emkostnye kolebaniia v elektromekhanicheskikh sistemakh [Elastic-capacitive vibrations in electromechanical systems]. *Aktual'nye problemy energosbergaiushchikh elektrotekhnologii APEET-2014. Sbornik nauchnykh trudov*. Ekaterinburg. Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2014, pp. 217-218.

23. Popov I.P. Uprugo-induktivnyi ostsilliator [Elastic-inductive oscillator]. *Rossiiskii nauchnyi zhurnal*, 2013, no. 1 (32), pp. 269-270.

24. Roginskaia L.E., Latypov A.R., Mednov A.A., Miniarov A.Kh. Issledovanie raboty mnogofunktsional'nykh transformatorov v kachestve ustroystv obespecheniia elektromagnitnoi sovmestimosti [Investigation of the operation of multifunctional transformers as devices for ensuring electromagnetic compatibility]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 21, pp. 36-48.

25. Sel'meneva D.S., Liske E.G., Shevtsov D.E. Issledovanie perekhodnykh protsessov pri upravliaemom vkluchenii silovogo transformatora [Investigation of transient processes during controlled switching on of a power transformer]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 24, pp. 161-177.

Сведения об авторе

Попов Игорь Павлович (Курган, Россия) – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» Курганского государственного университета (640002, Курган, ул. Советская, 63, e-mail: ip.popov@yandex.ru).

About the author

Igor P. Popov (Kurgan, Russian Federation) – Senior Lecturer of the Department "Technology of mechanical engineering, machine tools and instruments" Kurgan State University (640002, Kurgan, 63, Sovetskaya str., e-mail: ip.popov@yandex.ru).

Получено 24.07.2021