

**Секция «Электрификация и автоматизация горного производства»,  
научный руководитель – Семёнов А.С., канд. физ.-мат. наук, доцент**

**ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ  
НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Бондарев В.А., Семёнов А.С.

Политехнический институт, филиал  
ФГАОУ ВПО «Северо-восточный федеральный  
университет им.М.К. Аммосова» Мирный,  
e-mail: sash-alex@yandex.ru

На современных подземных горных предприятиях все большее распространение получают нагрузки, характеристики которых нелинейные. К их числу относятся, в первую очередь, различного рода вентиляные преобразователи, применяемые для регулирования координат электропривода. Широкое применение вентиляльных преобразователей (ВП) обусловлено высокими технико-экономическими показателями и эксплуатационными достоинствами, соответствующими современным требованиям технологических процессов и поэтому становятся главным средством управляемого преобразования электрической энергии в механическую.

Среди неблагоприятных особенностей ВП, ухудшающих их электромагнитную совместимость с питающими сетями электроснабжения, наиболее существенными являются потребление реактивной мощности на основной частоте и искажение формы напряжения, сопровождающееся генерированием в сеть высших гармоник (ВГ).

Обе эти особенности обусловлены коммутацией вентилялей, но имеют разный механизм происхождения.

Потребление преобразователями реактивной мощности (РМ) на частоте основной гармоник напряжения происходит из-за того, что коммутация тиристорных приводов приводит к отставанию первой гармоники тока от коммутирующих электродвижущих сил, а искажение формы напряжения – из-за того, что эти же коммутации приводят к появлению ВГ в кривой тока.

ВГ напряжения и тока неблагоприятно влияют на электрооборудование, системы автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи: появляются дополнительные потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; возрастает аварийность в кабельных сетях; ухудшается качество работы, а иногда появляются сбои в работе систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

Отсюда – необходимость и важность решения проблемы ЭМС. Источников ВГ – в данном случае ВП с сетями электроснабжения и другими нагрузками, понимая под ЭМС «способность электроустановки функционировать в заданной электромагнитной среде так, чтобы не вызывать недопустимого электромагнитного воздействия (недопустимых помех) на эту среду и находящиеся в ней устройств.

Расчет электрических потерь на частотах гармоник необходим для уточнения потерь в сетях предприятий и энергосистем, а также для оценки срока службы электрооборудования. Эти потери относятся к так называемым добавочным потерям, которые определяются помехами в электрических сетях. Методы расчета потерь в электрооборудовании, представленные различными авторами, являются приближенными в силу различных причин. Так, частотные характеристики активных и реактивных сопротивлений электрооборудования являются усредненными, относящимися

к конкретному виду оборудования (электродвигателям, трансформаторам, конденсаторам и др.). Нелинейности этих характеристик учитываются с помощью коэффициентов, которые, как правило, различны для разных частот. Влияние поверхностного эффекта и эффекта близости учитывается коэффициентом, характерным для резкого проявления поверхностного эффекта, т.е.  $\sqrt{\nu}$ , где  $\nu$  – номер гармоники. Влияние температуры нагрева сопротивления проводников не учитываются.

Предпринимались попытки оценить уровни погрешностей оценки этих добавочных потерь. С этой целью выполнялись расчеты согласно известным методикам для конкретных случаев. Оказалось, что на частотах ВГ до 13-й включительно погрешности расчётов положительны и, как правило, не превышают 7%, а в 95% случаев составляют до 5%. Сказанное относится к расчётам на частотах канонических гармоник. Погрешности расчёта потерь на частотах интергармоник к настоящему времени не достаточно изучены.

**Потери в электрических машинах.** При работе АД и СД в условиях несинусоидального напряжения возникают добавочные потери мощности, обусловленные временными ВГ тока в обмотках, а также относительно небольшие потери в стали статора и ротора.

Потери в асинхронном двигателе, обусловленные током  $\nu$ -й ВГ:

$$\Delta P_{a.d.\nu} = 3I_{\nu}^2 (R_{ct\nu} + R'_{rot\nu}),$$

где  $R_{ct\nu}$  и  $R'_{rot\nu}$  соответственно активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора на частоте  $\nu$ -й гармоники.

Суммарные потери на частотах ВГ:

$$\Delta P_{a.d.\nu} = \Delta P_{ct\text{ ном}} k_n^2 \frac{U_{\nu}^{*2}}{\nu\sqrt{\nu}} + \Delta P_{rot\text{ ном}} k_n^2 \frac{U_{\nu}^{*2} \sqrt{\nu \pm 1}}{\nu^2},$$

где  $\Delta P_{ct\text{ ном}}$  и  $\Delta P_{rot\text{ ном}}$  – номинальные потери в обмотках статора и ротора;  $U_{\nu}^*$  – относительные значения напряжения  $\nu$ -й гармоники;  $k_n$  – кратность пускового тока.

Для АД средней и большой мощности обычно  $R_{ct\nu} \approx R'_{rot\nu}$ , поэтому, приняв  $\sqrt{\nu \pm 1} \approx \sqrt{\nu}$ , получим следующую расчетную формулу:

$$\Delta P_{a.d.\nu} = 2\Delta P_{ct\text{ ном}} k_n^2 \sum_{\nu=2}^{\infty} \frac{U_{\nu}^{*2}}{\nu\sqrt{\nu}}.$$

В синхронных машинах потери, обусловленные ВГ, определяются по выражению, аналогичному выражению для АД:

$$\Delta P_{c.d.\nu} = k_{c.m} P_{ном} \sum_{\nu=2}^n \frac{U_{\nu}^{*2}}{\nu\sqrt{\nu}}.$$

Практика свидетельствует, что даже в случае недопустимых искажений напряжения ( $K_U=10\div 15\%$ ) добавочные потери от временных гармоник в СД в шихтованными статором и ротором не превосходят нескольких процентов номинальных потерь, поэтому перегрев явнополюсных СД с шихтованными полюсами на промышленных предприятиях не наблюдался.

Потери от ВГ в синхронных двигателях и компенсаторах с массивными полюсами оказываются значи-

тельно большими. Работа таких электродвигателей при несинусоидальном напряжении чревата опасностью недопустимого перегрева и повреждения обмотки возбуждения.

**Потери в трансформаторах.** В трансформаторах добавочные потери на частотах ВГ зависят от конструкции в двухобмоточных трансформаторах. Суммарные потери, обусловленные токами ВГ, составляют:

$$\Delta P_{\Sigma v} = 0,6 \frac{\Delta P_{кз}}{u_{кз}^2} \sum_{v=2}^n \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}} (1 + 0,05v^2).$$

**Потери от высших гармоник в ЛЭП** определяются из выражения:

$$\Delta P_{\Sigma v, г. ЛЭП} = 3 \sum_{n=2}^n I_{(n)}^2 r_{0(n)} k_{r(n)},$$

Коэффициент изменения активного сопротивления токоведущих частей на частоте  $n$ -й гармоники  $k_{r(n)} = \sqrt{n}$ .

Активное сопротивление проводника на частоте  $n$ -й гармоники

$$r_{0(n)} = r_0 (K_{\Pi} + K_{\delta}),$$

где  $K_{\Pi}$  и  $K_{\delta}$  – коэффициенты, учитывающие соответственно поверхностный эффект и эффект близости проводников в линии электропередач.

Общие потери от высших гармоник в электрооборудовании и в линиях электропередачи определяются суммой потерь электроэнергии по элементам.

Иногда добавочные потери от ВГ достигают значительного уровня, что исчисляется миллионными убытками при наличии производстве большого количества электрооборудования средней и большой мощности. В качестве технических средств направленных на снижения уровня гармоник можно выделить два метода: рациональное проектирование схемы электроснабжения; применение специальных технических средств.

Снижение уровней гармоник рациональным построением схемы электроснабжения, при которой обеспечивается допустимый уровень гармоник напряжения на шинах потребителя, осуществляется путем выделения нелинейных нагрузок на секции шин, питающиеся от отдельных двухобмоточных трансформаторов или отдельных обмоток трехобмоточных трансформаторов связи с энергосистемой; подключения параллельно нелинейным нагрузкам синхронных электродвигателей и компенсаторов, асинхронных электродвигателей и других линейных нагрузок. Очевидно, что этот метод может быть успешно применен в стадии проектирования или при капитальной реконструкции.

Метод применения специальных технических средств, прежде всего, предусматривает применение различного рода фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств, которые регулируются на определенные гармоники, особенностью работы фильтров является возможность беспрепятственно пропускать к приемникам тока одних частот и задерживать или пропускать, но с большим затуханием, токи других частот.

#### Список литературы

1. Семёнов А.С., Бондарев В.А. Выбор контрольно-измерительной техники для регистрации показателей качества электроэнергии // Студенческий научный форум – 2015 [Электронное издание], 2015.
2. Семёнов А.С., Самсонов А.В., Матул Г.А., Черенков Н.С., Заголило С.А., Мартынова А.Б. Исследование качества электроэнергии при проведении энергоаудита учебного корпуса // Естественные и технические науки. – 2015. – № 10 (88). – С. 331-334.
3. Семёнов А.С., Самсонов А.В., Бебихов Ю.В., Матул Г.А. Измерение и анализ показателей качества электрической энергии потре-

бителей промышленных предприятий // Естественные и технические науки. – 2015. – № 6 (84). – С. 446-450.

4. Семёнов А.С., Бондарев В.А. Выбор контрольно-измерительной техники для регистрации показателей качества электроэнергии // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4. – С. 414-416.

5. Семёнов А.С., Черенков Н.С. Анализ показателей качества электроэнергии при работе асинхронного двигателя от трёхфазного источника питания // Наука и инновационные разработки – Север: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2014. – С. 106-107.

6. Кузнецов Н.М., Семенов А.С., Бебихов Ю.В., Рыбников А.В. Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника // Горный журнал. – 2014. – № 1. – С. 23-26.

7. Семенов А.С., Кузнецов Н.М. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике // Измерительная техника. – 2014. – № 4. – С. 31-34.

8. Семёнов А.С., Матул Г.А., Хазиев Р.Р., Шевчук В.А., Черенков Н.С. Анализ показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трёхфазного источника питания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-6. – С. 1210-1215.

9. Semenov A.S. Measurement and analysis parameters quality of electric energy on the mining enterprises // Наука и технологии. – 2014. – № 3. – С. 22-28.

10. Карташев И.И., Тульский В.Н., Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: Монография. – М., 2013. – 144 с.

11. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4-2. – С. 295-299.

12. Кузнецов Н.М., Бебихов Ю.В., Самсонов А.В., Егоров А.Н., Семёнов А.С. Качество электрической энергии горных предприятий: Монография. – М., 2012. – 68 с.

13. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С., Шипулин В.С. Теоретические основы выбора показателей качества электрической энергии по обеспечению электромагнитной совместимости в распределительных системах электроснабжения / Отчет о НИР № ВКТОКП 96 4830 3 от 01.01.2010 (Министерство образования и науки РФ).

14. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Самсонов А.В., Егоров А.Н., Шипулин В.С., Рушкин Е.И. Разработка и внедрение системы мониторинга показателей качества электрической энергии для снижения энергоёмкости производства и повышения эффективности работы электрооборудования / Отчет о НИР № ВКТОКП 96 4830 3 от 01.01.2010 (Министерство образования и науки РФ).

15. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Система мониторинга показателей качества электроэнергии применительно к алмазодобывающему подземному руднику // В сборнике: В мире научных открытий материалы IV международной научно-практической конференции (24 июня 2012 г.): сборник научных трудов / под науч. ред. С.П. Акутиной. – М.: Центр науч. мысли, 2012. – С. 146-149.

16. Semenov A.S. Development of monitoring system for measuring the quality of electrical energy on the mining industry // Applied and Fundamental Studies Proceedings of the 1st International Academic Conference. Edited by Yan Maximov, 2012. – С. 301-304.

17. Семенов А.С. Разработка системы мониторинга показателей качества электроэнергии горных предприятий // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 11. – С. 68-73.

### ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

Винокуров В.С., Матул Г.А.

Политехнический институт, филиал  
ФГАОУ ВПО «Северо-восточный федеральный  
университет им. М.К. Аммосова», Мирный,  
e-mail: mailbox428@gmail.com

#### Понятие о программируемом логическом контроллере

Любое устройство, способное работать автоматически, имеет в своем составе управляющий контроллер – модуль, определяющий логику работы устройства.

Программируемый логический контроллер (сокращенно ПЛК) – электронная составляющая промышленного контроллера, специализированного (компьютеризированного) устройства, используемого для автоматизации технологических процессов.

Физически типичный ПЛК представляет собой блок, имеющий определенный набор выходов и входов для подключения датчиков и исполнительных механизмов. Логика управления описывается программно на основе микрокомпьютерного ядра. Абсолютно