

При несинусоидальности напряжения и тока в электрической сети компенсация реактивной мощности для повышения  $\cos\varphi$  с помощью наиболее распространенных батарей статических конденсаторов значительно осложняется или вообще оказывается невозможной. Это связано с несколькими основными причинами. Во-первых, батареи конденсаторов могут долгое время работать при перегрузке токами высших гармоник не более чем на 30%, но при этом допустимое повышение напряжения на их зажимах составляет 10%. Однако сопротивление именно конденсаторов значительно уменьшается с увеличением частоты, поэтому в таких условиях срок их службы сокращается (особенно для батарей, которые подключаются к сети непосредственно, т.е. без защитных реакторов). Во-вторых, величины емкости конденсаторов и индуктивности электрической сети могут спровоцировать в системе электроснабжения режим, близкий к резонансу токов на частоте любой из гармоник. Конечно, такой режим приводит к перегрузке батарей конденсаторов и соответственно к выходу их из строя. В-третьих, резкопеременный режим потребления реактивной мощности (кратковременные броски и провалы – см. рис. 2, а) при применении системы электропривода на базе тиристорных преобразователей делает неэффективным использование нерегулируемых или ступенчато регулируемых конденсаторных установок. Для таких условий необходимо внедрение фильтрокомпенсирующих устройств, величина генерируемой реактивной мощности которых изменяется в реальном времени. Регулируемое фильтрокомпенсирующее устройство обеспечивает снижение несинусоидальности кривых напряжения и тока за счет фильтрации соответствующих гармоник, а также поддерживает на постоянном уровне высокое (близкое к единице) значение коэффициента мощности на шинах подстанции, к которой оно подключается. Необходимо отметить, что существует положительный опыт внедрения таких устройств на угольных шахтах Украины.

### Выводы

1. Режимы работы скиповых подъемных установок с системами регулируемого электропривода на базе тиристорных преобразователей характеризуются низкими значениями коэффициента мощности 0,4–0,45 и высокими уровнями коэффициента несинусоидальности напряжения, который достигает 8% и более.

2. Проблема повышения качества электроэнергии в электрических сетях с нелинейной нагрузкой, которая обостряется в последнее время из-за широкого внедрения систем электропривода на базе тиристорных преобразователей, требует комплексного решения как в части снижения несинусоидальности, так и в части компенсации реактивной мощности. Одним из эффективных способов ее разрешения является применение в системе электроснабжения регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*

УДК: 621.31

**В.В. Кузнецов канд. техн. наук**

*(Украина, Днепрпетровск, Национальная металлургическая академия Украины)*

## О ВЛИЯНИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ВЫБОР СРЕДСТВ ДЛЯ ИХ ПОВЫШЕНИЯ

### Введение

Негативное влияние некачественного питающего напряжения на показатели электромеханических систем хорошо известно [1,2]. В асинхронном электроприводе при наличии несинусоидальности и (или) несимметрии питающего напряжения появляются пульсации момента, развиваемого двигателем, повышается вибрация, приводящая к снижению надежности агрегата. Кроме того, наблюдается увеличение внутренних потерь, что отрицательно сказывается на энергетических показателях установки. Асинхронные двигатели малой и средней мощности (до 100 кВт), как правило, работают в составе нерегулируемого привода вспомогательных производственных механизмов. Установка частотных преобразователей для регулирования их производительности, безусловно, является решением проблемы некачественности питающего напряжения, однако в большинстве случаев она экономически нецелесообразна.

Между тем, количество таких приводов и доля потребляемой ими энергии в процессе производства довольно велики. Вследствие этого меры по энергосбережению в таких агрегатах, а тем более не требующие значительных материальных затрат, будут иметь существенный экономический эффект. Учитывая, что ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего

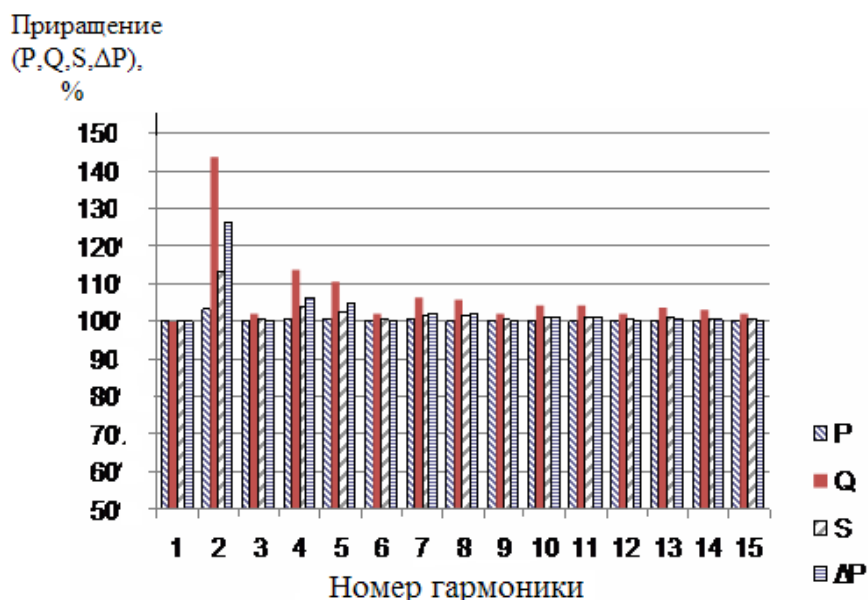
назначения» нормирует как интегральные показатели несинусоидальности (коэффициент искажения питающего напряжения), так и коэффициенты каждой гармонической составляющей [3], то задачами исследований стали анализ влияния последних на энергетические показатели асинхронного электродвигателя и разработка мероприятий по их повышению.

### Результаты исследований

Для исследования влияния некачественного напряжения проведено моделирование работы электродвигателей с номинальным напряжением 380 В в диапазоне мощностей 0,75 – 250 кВт. Использована модель АД, позволяющая оценивать энергетические и динамические показатели при произвольно заданной форме напряжения питания [4].

В качестве основных оценочных показателей качества работы электродвигателя приняты составляющие потребляемой мощности (активная  $P$ , реактивная  $Q$  и полная  $S$ ), КПД, коэффициент мощности, уровни пульсаций тока статора и момента. При исследовании влияния высших гармоник задавалось питание для одной из них (вплоть до 15-й) и основной.

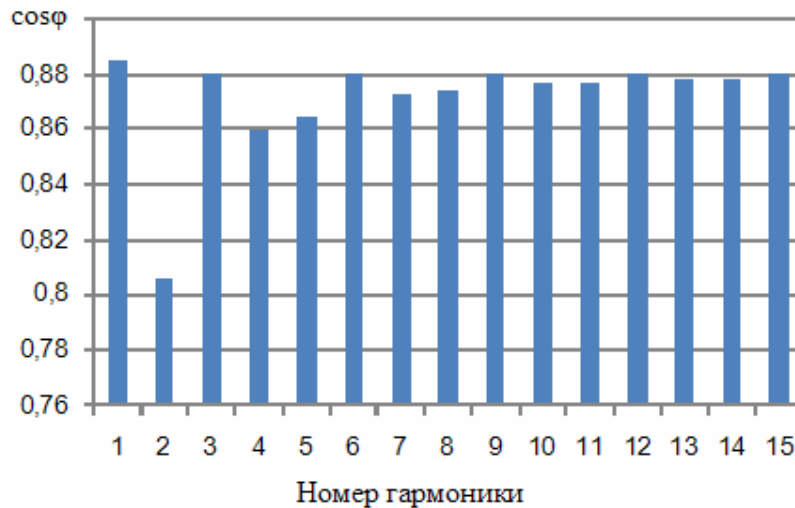
Действующее значение высшей гармоники задавалось на уровне 10%-ного номинального напряжения двигателя. Для удобства проведения сравнительного анализа результаты исследований представлены в относительных единицах. При этом за базовую величину каждого показателя ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$  и т.д.) приняты значения, соответствующие идеальному напряжению питания. На рис. 1 в качестве примера изображена гистограмма изменения исследуемых параметров от номера гармонической составляющей для двигателя мощностью 7,5 кВт.



**Рис. 1. Гистограмма изменения основных энергетических показателей двигателя мощностью 7,5 кВт при наличии соответствующих высших гармоник в его питании**

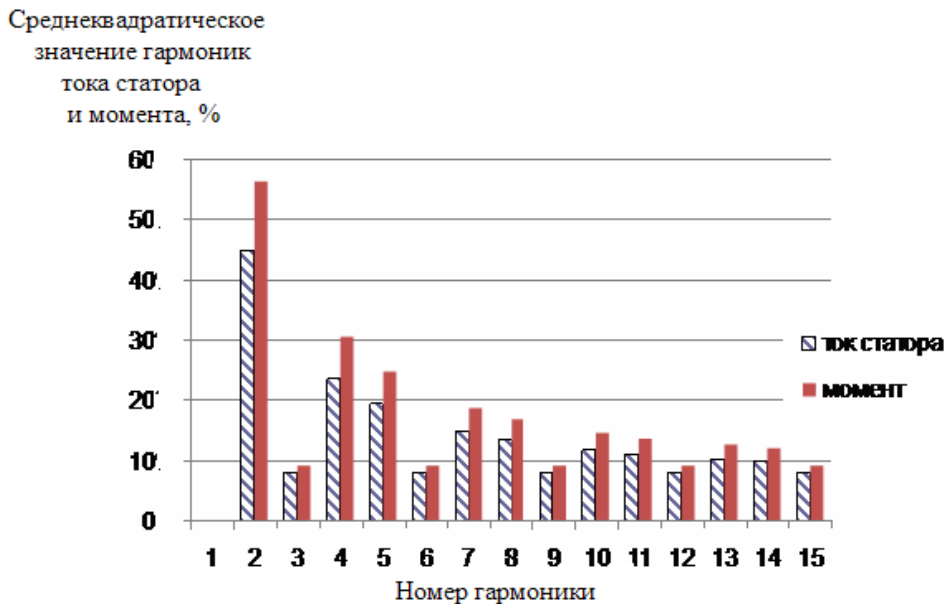
Учитывая, что исследовались двигатели с соединением обмоток статора в звезду при отсутствии нулевого провода (как наиболее распространенный способ подключения обмоток АД в промышленности); кратные трем гармоники, образующие нулевую последовательность напряжения, не вызывали изменения исследуемых энергетических параметров, поскольку они отсутствуют в спектрах токов. Это связано с тем, что для указанных гармоник при отсутствии нулевого провода нет цепи для протекания.

В остальных случаях наличие в спектре питающего напряжения дополнительной гармоники приводит к росту составляющих потребляемых мощностей и суммарных потерь. В процентном соотношении наибольший прирост происходит по реактивной мощности, т.е. появление высших гармоник ухудшает коэффициент мощности двигателя, как это показано на рис. 2 для двигателя той же мощности.



**Рис. 2. Гистограмма коэффициента мощности двигателя 7,5 кВт при наличии в питающем напряжении соответствующих дополнительных гармоник**

В целом анализ полученных данных показывает, что для двигателей в исследуемом диапазоне мощностей влияние высших гармоник снижается с ростом их частоты. Это объясняется тем, что обмотки АД являются естественным индуктивным фильтром, реактивное сопротивление которого возрастает с частотой. С увеличением номера гармоники в питающем напряжении при постоянстве ее амплитуды среднеквадратическое значение той же гармоники тока падает. Это справедливо также для пульсаций развиваемого момента. На рис. 3 изображены гистограммы указанных параметров для двигателя мощностью 22 кВт.



**Рис. 3. Гистограммы изменения среднеквадратического значения гармоник тока статора и момента, развиваемого двигателем мощностью 22 кВт с ростом номера гармоники (в % от соответствующих номинальных значений)**

Наиболее негативное действие на энергетические показатели двигателя и пульсации момента оказывает та же вторая гармоника. Это связано с двумя факторами. Первый, как уже было отмечено, вызван малым сопротивлением обмоток гармоникам тока низкой частоты. При этом в случае постоянства амплитуды доля участия второй гармоники всегда будет больше, чем, например, четвертой. Следующий фактор связан с тем, что составляющие токов второй гармоники образуют обратную последовательность и таким образом негативно влияют на момент двигателя. Гармоники седьмого порядка и выше некоторым образом сказываются на пульсациях момента АД, однако практически не влияют на его энергетику.

Кроме того установлено, что с ростом номинальной мощности снижается «чувствительность» двигателя к высшим гармоникам.

По полученным данным построены аппроксимирующие кривые (рис. 4), подтверждающие, что с ростом мощности двигателя приращение потерь, обусловленных гармоническими составляющими, снижается.

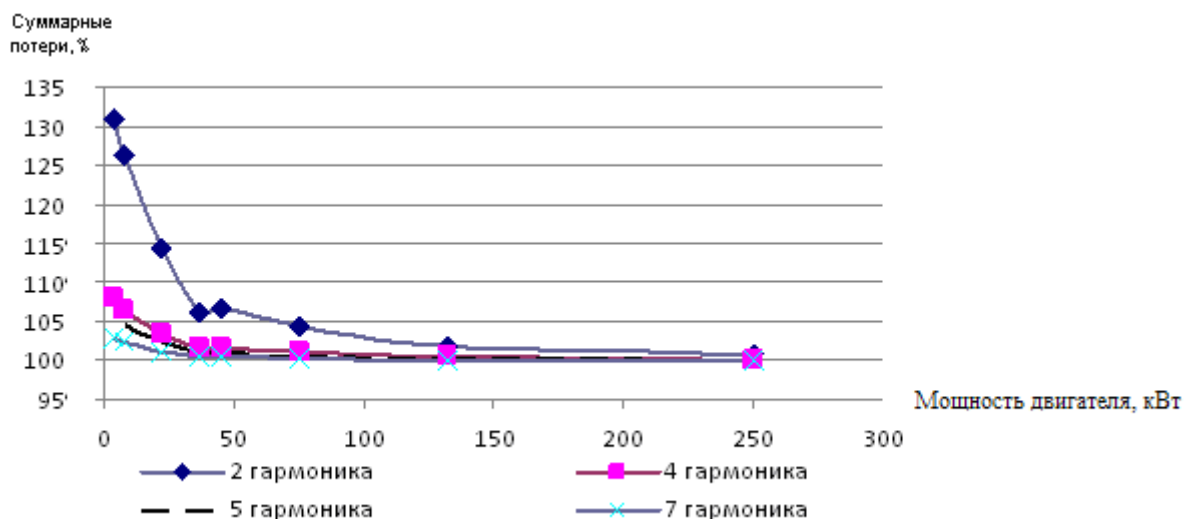


Рис. 4 Аппроксимированные кривые суммарных потерь от гармонических составляющих в зависимости от мощности двигателя

Кроме того, для каждой исследуемой гармоники было изучено влияние ее начальной фазы (при постоянстве амплитуды) на энергетические показатели и пульсации момента. Однако полученное изменение показателей не превышает десятых долей процента даже для второй гармоники. В результате можно утверждать, что начальные фазы гармоник практически не влияют на изменение регистрируемых показателей АД.

В настоящее время разработки в области выбора рационального метода повышения качества питающего напряжения и оценке параметров реализующего его устройства ведутся в направлениях активной фильтрации напряжения или применения пассивных резонансных фильтров.

Так, активные фильтры для трехфазных потребителей представляют собой, по сути, автономные инверторы напряжения, в звене постоянного тока которых установлен конденсатор [6]. Принцип действия такого устройства заключается в перераспределении напряжений между фазами за счет энергии, накапливаемой в этих емкостных элементах. К несомненным достоинствам активных фильтров относятся: возможность адаптации к различным формам кривых фазных напряжений; независимость их работоспособности от уровня нагрузки потребителей; компенсация как несинусоидальности, так и несимметрии фазных напряжений; возможность использования активного фильтра для компенсации искажений питающего напряжения одновременно нескольких потребителей; коррекция коэффициента мощности потребителей.

На фоне перечисленных несомненных достоинств активных фильтров, пожалуй, единственным недостатком является их высокая стоимость. При необходимости компенсации значительных реактивных составляющих мощности, например, во время пуска АД, силовые ключи следует выбирать того же порядка, что и потребителей. Это делает фильтрующее устройство по цене сопоставимым с частотным преобразователем. А как известно, последний позволяет не только полностью решать проблемы некачественного питающего напряжения, но и предоставляет массу дополнительных преимуществ, не обеспечиваемых активным фильтром. К ним следует отнести: возможность плавного пуска с контролируемыми токами и моментом; регулирование скорости производственного механизма; реализацию обратных связей и защит по технологическим параметрам и т.д.

Таким образом, активные фильтры, как правило, являются экономически необоснованным решением рассматриваемой проблемы. Перспективным направлением является интеграция их функций в мощные частотные преобразователи, позволяющие регулировать скорость одного из механизмов и одновременно осуществлять коррекцию напряжения в цеховой сети.

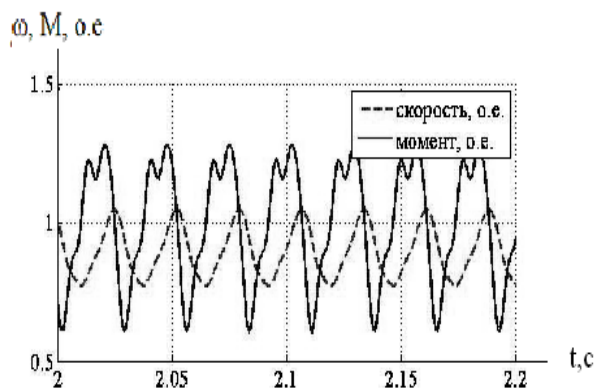
К пассивным фильтрам относятся последовательные и параллельные LC-цепочки, настроенные, как правило, на резонанс. Кроме низкой стоимости они долговечны, фактически не требуют наладки, обслуживания и ремонта. К недостаткам пассивных фильтров следует отнести: невозможность коррекции

несимметрии питающего напряжения; неустойчивость резонансных режимов для некоторых типов фильтров из-за дрейфа параметров потребителей.

Для повышения эффективности применения рассматриваемых устройств необходимо не только выбрать тип фильтра и определить его параметры (индуктивность и емкость), которые наилучшим образом корректируют напряжение на входе конкретного АД, но и найти компромисс между техническими и экономическими показателями такого решения.

Необходимый при этом анализ предложенных пассивных фильтров может быть выполнен с помощью разработанной модели АД [4,5]. Так как для фильтрации гармоник более высокого порядка целесообразно повышение индуктивности, то кажется предпочтительно последовательное включение дросселей в цепь питания АД. Более того, при таком подключении обеспечивается резонанс напряжений, и таким образом, минимизируется входное сопротивление для токов основной частоты.

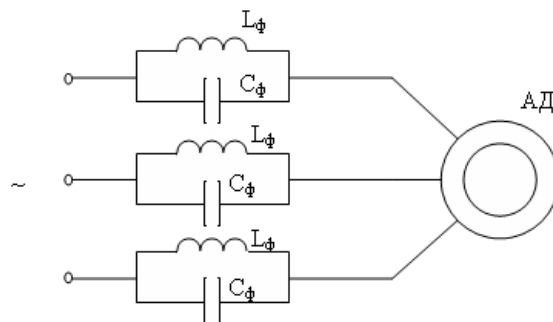
Однако этот режим не всегда устойчив. Вход в резонанс вызывает уменьшение результирующего сопротивления фильтров, и, таким образом, уменьшает падение напряжения на них. Повышение напряжения на зажимах асинхронного двигателя приводит к росту тока статора, и, соответственно, момента, что приводит к изменению скольжения. В результате изменяется результирующее комплексное сопротивление каждой фазы и условия резонанса нарушаются. На рис.5 проиллюстрирован полученный на модели неустойчивый режим работы асинхронного двигателя при подключении рассматриваемого LC-фильтра.



**Рис. 5.** Изменения момента и скорости АД при подключении последовательного LC-фильтра.

Возможно, применение последовательного LC-фильтра окажется оправданным для компенсации кратковременных провалов питающего напряжения, однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Как показано выше, наихудшее влияние на энергетические показатели АД оказывает вторая гармоника питающего напряжения. Поэтому фильтрация последней в питании асинхронных двигателей является наиболее приоритетной задачей. А для ее решения целесообразно применение параллельных LC-фильтров (рис. 6), настроенных на резонанс токов при частоте  $f_p=100$  Гц. При таком резонансе результирующее сопротивление фильтров для второй гармоники стремится к бесконечности, замыкая для нее электрическую цепь. Поэтому такие фильтры и получили название «пробка».

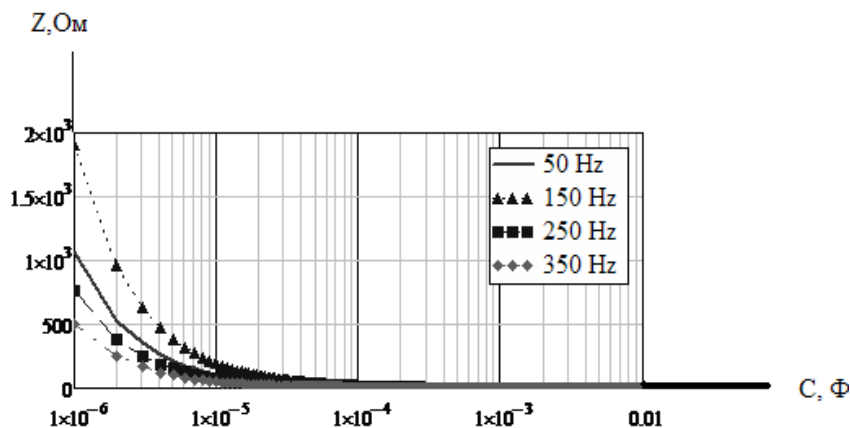


**Рис. 6.** Подключение параллельных LC-цепей для обеспечения резонанса токов на частоте 100 Гц.

Как известно, любое сочетание индуктивностей и емкостей, удовлетворяющее условию  $(2 \cdot \pi \cdot f_p)^2 \cdot L \cdot C = 1$ , обеспечит резонанс токов. Однако при этом необходимо прежде всего учесть результирующее комплексное сопротивление фильтров-пробок для основной гармоники (50 Гц), величина

которого существенно влияет на их эффективность. Кроме того, немаловажна и стоимость используемых элементов фильтрующего устройства.

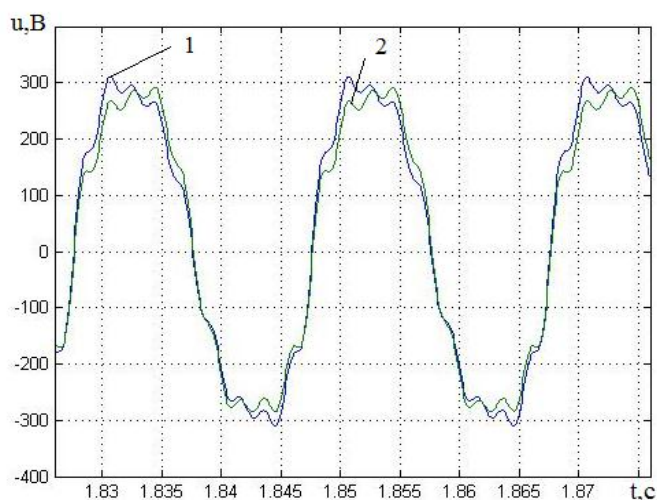
На рис. 7 показано изменение комплексного сопротивления фильтра-пробки при различных значениях емкости в диапазоне 1 мкФ-10 мФ. Индуктивность при этом выбиралась из условия резонанса на частоте 100 Гц. Графики представлены в логарифмическом масштабе. Сопротивление такого фильтра для второй гармоники стремится к бесконечности и поэтому на рисунке не показано.



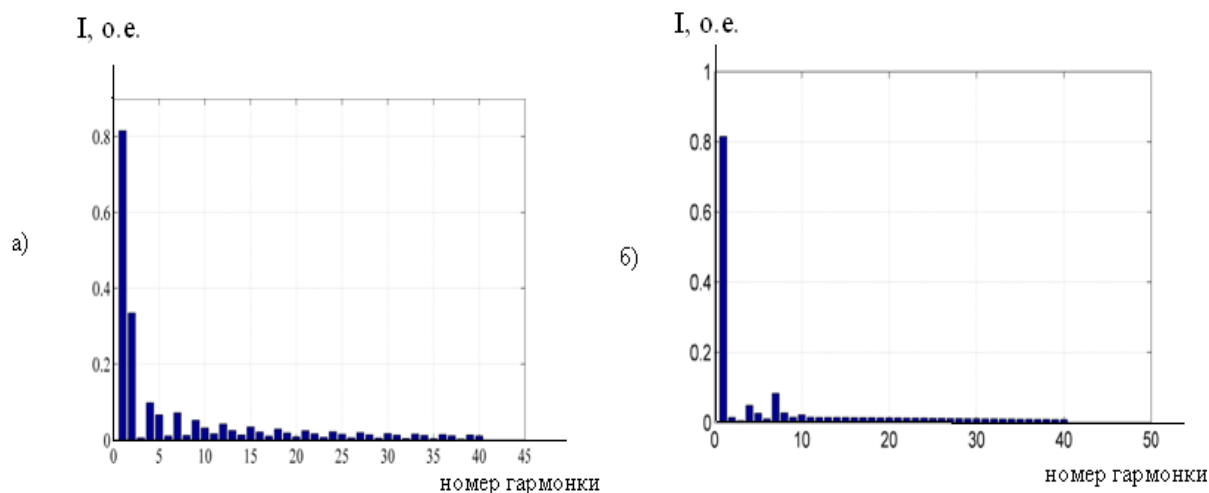
**Рис. 7. Зависимость результирующего сопротивления фильтра-пробки от величины используемой в нем емкости**

Анализ представленных графиков свидетельствует, что с ростом емкости сопротивление рассматриваемого фильтра быстро падает. Для третьей гармоники оно всегда выше, чем для первой (основной), что является положительным фактором. В дальнейшем, с ростом частоты гармоники сопротивление фильтра-пробки понижается. Очевидно, что применение фильтров со входным сопротивлением порядка сотен Ом на основной частоте недопустимо из-за значительного падения напряжения на них. Поэтому нижней границей емкости являются значения около 100 мкФ ( $10^{-4}$  Ф), при котором его входное сопротивление составляет единицы Ом. Верхняя граница должна определяться эффективностью фильтра по интегральным экономическим критериям. Если выбрать емкость в допустимом диапазоне  $1 \cdot 10^{-4} - 0.01$  Ф, то индуктивность будет принимать значения 25 - 0.5 мГн, а результирующее сопротивление фильтров при этом составит 10 - 0.1 Ом.

Эффективность применения выбираемых таким образом фильтров-пробок была проверена путем моделирования. На рис. 8 показаны графики напряжения до и после фильтров для случая, когда в питающем напряжении преобладает вторая гармоника. Как видно форма кривой фазного напряжения в данном случае выравнивается. При этом спектр тока статора с фильтром и без него принимает вид (рис.9)



**Рис. 8. Фазное напряжение до (1) и после (2) параллельного фильтра-пробки**



**Рис. 9.** Спектр тока статора при питании АД без фильтров (а) и при применении фильтров-пробок (б).

Анализ приведенного спектрального состава при применении фильтров-пробок, настроенных на резонанс 100 Гц, свидетельствует о практически полном подавлении второй и всех гармоник свыше десятого порядка.

**Выводы**

1. При наличии в питании АД дополнительных гармоник больше всего изменяется уровень потребляемой реактивной мощности (падает коэффициент мощности).
2. С ростом номера гармоники ее действие на все энергетические показатели и уровень пульсаций момента уменьшается. Это связано с ростом индуктивного сопротивления обмоток АД при повышении частоты гармоники.
3. Наиболее негативное воздействие на энергетику и пульсации момента АД оказывает вторая гармоника.
4. Начальная фаза гармоники практически не влияет на показатели АД.
5. С ростом номинальной мощности двигателя снижается его чувствительность к наличию в напряжении питания высших гармоник.
6. Сопоставление известных способов фильтрации некачественного питающего напряжения свидетельствует о целесообразности применения пассивных фильтров-пробок, настроенных на резонансную частоту 100 Гц, так как они позволяют практически полностью подавить вторую гармонику, что способствует повышению энергетических показателей электроприводов и эффективности агрегатов, в составе которых они работают.

Указанные обстоятельства определяют приоритеты исследований в области энергоэффективности асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественного питания. Очевидно, что необходимо подавлять вторую гармонику тока статора. Это существенно улучшит энергетические показатели АД и снизит пульсации момента. Также следует учитывать повышенное влияние некачественного питающего напряжения на энергетику двигателей малой мощности. Суммарная мощность, потребляемая такими двигателями, превышает мощность больших агрегатов, а значит, наличие высших гармоник в питающей сети приводит к повышенным потерям именно в этих двигателях.

**Список литературы**

1. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией. / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов, В.Б. Траппер. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. — 2008. — Вип.80. — С. 58-62.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. — 257 с.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК. — К.: Изд-во стандартов, 1998. — 15 с.
4. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. — 2009. — №3. — С. 56-58.

5. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Моделирование асинхронного двигателя для условий некачественного питания. Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах. // Материалы междунар. науч.-техн. конф. — Севастополь, 2009. — С. 55-56.

6. Електромагнітна сумісність в системах електропостачання. /І.В.Жежеленко, А.К.Шидловський, Г.Г.Півняк, Ю.Л. Сасенко. – Дніпропетровськ: Видавництво НГУ, 2009. - 323 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Качаном Ю.Г.*

УДК 652.1:586.24

**О.О. Азюковський, канд. техн. наук**

*(Україна, м. Дніпропетровськ, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)*

## **ПОТЕНЦІАЛ ПІДЗЕМНОГО МЕТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ СФОРМОВАНИЙ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ**

**Вступ.** Електрохімічний захист підземних металевих трубопроводів є актуальною задачею, з огляду на те, що газопровідна система України є однією з найстаріших у Європі. Розгалужена система підземних газопроводів високого, середнього тиску та розподільчих мереж з низьким тиском газу, на сьогоднішній день складається, переважно, з металевих трубопроводів. Забезпечення цілісності цієї системи зумовлено також потребами мінімізувати втрати газу під час його транспортування, екологічними обмеженнями тощо. Мінімізація корозійних негативних наслідків, шляхом зменшення струмів витоку з підземного металевого трубопроводу до навколишнього ґрунту здійснюється внаслідок формування захисного потенціалу на трубопроводі. У випадку, коли захисний потенціал є значно нерівномірним за довжиною трубопроводу або за часом, виникають струми вирівнювання, що протікають поверхнею металу. В точках витікання струму з металеві труби активно розвивається корозія, що призводить до порушення цілісності трубопроводу та витоку з нього речовини, що транспортується.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить,** що розвиток сучасної елементної бази і технологій виміру електротехнічних величин, зумовлюють проблему забезпечення незмінності захисного потенціалу підземного металофонду з часом через розширення переліку електромагнітних впливів на розподілену систему підземних сталевих газопроводів [1 – 3]. Ця проблема є актуальною й неповною мірою вирішеною [4,5]. Неузгодженість роботи активних елементів системи захисту від електрохімічної корозії зумовлює використання інших підходів до забезпечення потрібного захисного потенціалу. Особливо в умовах активного впливу струмів, що блукають [4,5]. Складність математичного опису об'єкту, що є розгалуженим у просторі й знаходиться під одночасним впливом багатьох параметрів та у середовищі, якому властиві різні фізико-хімічні характеристики викликає необхідність додаткових досліджень [6,7].

**Метою роботи** є обґрунтування необхідності уточнення методик вимірювання потенціалу підземного металевого трубопроводу, що захищається від електрохімічної корозії напівактивними засобами захисту.

**Матеріали досліджень.** Система електрохімічного захисту є ефективним засобом протидії електрохімічній корозії. Розрізняють три види електрохімічного захисту підземного металофонду (рис. 1):

- протекторний захист;
- катодний захист;
- електродренажний захист.

Протекторний захист здійснюється за допомогою гальванічного елемента – анода протектора (рис. 1,а). При його з'єднання з металевим трубопроводом утворюється гальванічна пара. У цій парі підземний металевий трубопровід відіграє роль катода, внаслідок від'ємного електричного потенціалу. Це зумовлює стікання електронів на катод а іонів до ґрунту. Струм, що утворюється, натікає до підземного металевого трубопроводу, що і є головною метою електрохімічного захисту.

Катодний захист відрізняється від протекторного в основному тим, що струм натікання на металевий об'єкт, що захищається, утворено зовнішнім джерелом (рис. 1,б). В якості анода використовується будь-який заземлювач, головною вимогою до якого є спроможність утворювати умови для протікання струму з ґрунту до металевого трубопроводу.

Електродренажний захист в якості захисного струму використовує струм, що блукає (рис. 1,в). Цей струм зумовлений насамперед залізничним електротранспортом. Рейки є провідником тягового електричного струму. Внаслідок опору його протіканню, струм стікає з рейок до ґрунту й натікає до підземного металевого трубопроводу. У точці витоку струму з трубопроводу виникає інтенсивний корозійний про-