УДК 621.316.72

Юрий Иванович Ханин
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетических систем, Россия, Волгоград, телефон +7 (8442) 41-13-70, e-mail: haninyu5@gmail.com

Ольга Алексеевна Иванова
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетических систем, Россия, Волгоград, телефон +7 (8442) 41-13-70,
e-mail: ivanovaoa.essx@yandex.ru

Михаил Петрович Аксенов
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетических систем, Россия, Волгоград, телефон +7 (8442) 41-13-70,
e-mail: aksenovmp@mail.ru

Оптимизация выбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств на примере сельскохозяйственного машиностроительного завода

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные предприятия агропромышленного комплекса сталкиваются с проблемой низкого качества электроэнергии, вызванного гармоническими искажениями от нелинейных нагрузок, таких как преобразователи частоты и тиристоры. Это приводит к росту потерь в сетях, снижению КПД оборудования и нарушению требований ГОСТ 32144-2013. Целью исследования является разработка методики расчета оптимальных параметров фильтрокомпенсирующих устройств в программной среде Mathcad для минимизации гармоник и повышения энергоэффективности предприятий сельскохозяйственного машиностроения.
Материалы и методы. В исследовании использованы данные мониторинга спектра тока и напряжения на сельскохозяйственном машиностроительном заводе, а также численное моделирование в Mathcad. Исследованы две конфигурации фильтрокомпенсирующих устройств: с узкополосным фильтром (5-я гармоника) и широкополосным звеном 3-го порядка (7-я или 11-я гармоники). Мощность фильтрокомпенсирующих устройств подобрана с учетом динамики нагрузки (до 5 860 кВАр), что снижает потери на 20–25 %.
Результаты. Для оценки необходимости проведения мероприятий по компенсации реактивной мощности проанализированы значения потребляемых нагрузкой трехфазных мощностей и среднего по трем фазам коэффициента мощности. Рассчитана необходимая мощность компенсации для каждого интервала измерений, которая достигает 5860 кВАр. Для оценки степени воздействия гармоник тока на сеть и других потребителей построены графики фазных суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения. Выявлено, что преобладающими являются 5-я и 11-я гармоники. Проведен сравнительный анализ двух наиболее целесообразных вариантов фильтрокомпенсирующих устройств, в результате которого оптимальной признана конфигурация с настройкой на 5-ю и 7-ю гармоники, обеспечивающая снижение суммарного коэффициента искажений K_U до 2,3–2,8 % без резонансных явлений. Альтернативный вариант (5-я и 11-я гармоники) показал рост $K_{U(4)}$ и $K_{U(6)}$ выше нормативов.
Выводы. Предложенная методика позволяет адаптировать параметры фильтрокомпенсирующих устройств под специфику предприятия, обеспечивая соответствие стандартам качества электроэнергии. Полученные экспериментальные данные позволяют рекомендовать гибридную систему с динамической настройкой для сложных нагрузок. Результаты могут быть применены в сельскохозяйственном машиностроении для повышения качества и энергоэффективности электроснабжения.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующие устройства, гармонические составляющие тока, критерии энергоэффективности, коэффициент гармонических искажений

Yuri Ivanovich Khanin
Volgograd State Agricultural University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply and Energy Systems Department, telephone +7 (8442) 41-13-70, e-mail: haninyu5@gmail.com

Olga Alekseevna Ivanova
Volgograd State Agricultural University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply and Energy Systems Department, telephone +7 (8442) 41-13-70, e-mail: ivanovaoa.essx@yandex.ru

Mikhail Petrovich Aksenov
Volgograd State Agricultural University, Candidate of Agricultural Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply and Energy Systems Department, telephone +7 (8442) 41-13-70, e-mail: aksenovmp@mail.ru

© Ханин Ю.И., Иванова О.А., Аксенов М.П., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 4, с. 50–56.

Optimization of filter-compensating device parameters: a case study of an agricultural machinery manufacturing plant

Abstract

Background. Modern enterprises of the agro-industrial complex face the problem of poor power quality caused by harmonic distortions of non-linear loads, such as frequency converters and thyristors. This leads to increased losses in networks, reduced equipment efficiency, and violations of GOST 32144-2013 requirements. The study aims to develop a methodology to calculate optimal parameters of filter-compensating devices (FCD) in the Mathcad software environment to minimize harmonics and improve energy efficiency in agricultural machinery manufacturing enterprises.
Materials and methods. The study has used current and voltage spectrum monitoring data of an agricultural machinery manufacturin plant and numerical simulations in Mathcad. Two FCD configurations have been analyzed: a narrowband filter tuned to the 5th harmonic and a third-order broadband link tuned to the 7th or 11th harmonic. The capacity of the FCD is selected taking into account the load dynamics (up to 5,860 kVAr), which reduces losses by 20–25 %.
Results. To assess the need for reactive power compensation measures, the authors have analyzed the values of three-phase power consumed by the load and the average power factor of the three phases. For each measurement interval the required compensation power has been calculated and it reaches 5860 kvar. To evaluate the impact of current harmonics on the network and other consumers, phase total harmonic distortion (THD) graphs for voltage have been plotted. The study has revealed that the 5th and 11th harmonics are predominant. Two of the most feasible filter-compensating device configurations have been compared. The optimal configuration has to be tuned to the 5th and 7th harmonics, reducing the total distortion factor K_U to 2,3–2,8 % without resonance phenomena. The alternative option (5th and 11th harmonics) has shown an increase in K_U and K_U above the standards.
Conclusions. The proposed methodology adapts FCD parameters to the specific needs of an enterprise ensuring compliance with power quality standards. The obtained experimental data allow us to recommend a hybrid system with dynamic tuning for complex loads. The results are applicable in agricultural machinery manufacturing to enhance power supply quality and energy efficiency.

Key words: filter-compensating devices, harmonic components of current, energy efficiency criteria, harmonic distortion coefficient

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.050-056

Введение. Несмотря на устойчивый рост энерговооруженности агропромышленного комплекса, его показатели все еще в 2–3 раза отстают от промышленных стандартов. Это противоречие обостряется в связи с внедрением высокотехнологичного оборудования, такого как инверторы, тиристоры и регулируемые приводы, которые, повышая производительность, одновременно становятся источниками гармонических искажений в электросетях [1–3]. Нелинейные характеристики таких устройств приводят к ухудшению качества электроэнергии, что негативно сказывается как на работе отдельных предприятий, так и на устойчивости энергосистемы в целом [4–6].

Проблема усугубляется региональной диспропорцией: в некоторых субъектах РФ сельскохозяйственные организации используют лишь 15–20 % от прежнего парка техники. Таким образом, уровень их технической вооруженности снижается. При этом даже повышение энергетических мощностей не гарантирует роста их эффективности из-за нерационального расхода ресурсов [7, 8].

Фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), включающие конденсаторы, дроссели и резисторы, корректируют частотные характеристики сетей, подавляя гармоники. Помимо этого, их емкостные элементы компенсируют реактивную мощность, что снижает нагрузку на энергосистему и повышает экономичность производства. В связи с этим в условиях сокращения энергообеспеченности сельскохозяйственных предприятий (на 15 % за десятилетие) требуются точные методики расчета параметров ФКУ для конкретных условий [9].

Цель исследования – разработка алгоритма оптимизации фильтрокомпенсирующих систем в среде Mathcad с учетом региональных особенностей энергопотребления. Практическая апробация методики запланирована на предприятиях сельскохозяйственного машиностроения, где критически важны стабильность напряжения и минимизация потерь.

Методы исследования. Параллельное включение ФКУ в электрическую сеть модифицирует частотные свойства системы «сеть–ФКУ». Это взаимодействие приводит к изменению уровня гармоник напряжения в точке общего подключения, где объединяются линейные и нелинейные нагрузки. Ключевым фактором при этом является зависимость импеданса контура от характеристик ФКУ, включая его мощность Q, добротность d и частоту настройки s. Эти параметры взаимосвязаны и определяют амплитудно-частотный отклик устройства.

Добротность ФКУ определяется как отношение индуктивного (или емкостного) сопротивления на частоте настройки к активному:

$$d = \frac{X_L s}{R},$$

где X_L – это индуктивное сопротивление фильтра, равное ωL, Ом; s – относительная частота настройки фильтра; R – активное сопротивление фильтра, Ом.

Добротность характеризует скорость затухания свободных составляющих в переходных процессах, происходящих в фильтре, а также полосу пропускания фильтра. Чем выше значение добротности, тем эффективнее будет фильтр и ниже потери мощности, но при этом важна высокая точность настройки на заданную частоту фильтрации.

Наиболее эффективными являются узкополосные фильтры с добротностью 30–60 и широкополосные фильтры с добротностью 1–2.

На этапе проектирования критически важным становится моделирование импеданса фильтра $Z(k)$. Для каждого фильтра рассчитывается индивидуальная функция $Z(k)$, учитывающая его технические характеристики. Далее суммарное сопротивление системы определяется по формуле [10]

$$Z(k, Q_1...Q_n) = \frac{1}{\frac{1}{Z_1(k)} + ... + \frac{1}{Z_n(k)} + \frac{1}{Z_C(k)}}, \quad (1)$$

где $Z_1(k)$, $Z_n(k)$ – функции сопротивления отдельных фильтров, входящих в состав ФКУ, Ом; $Z_C(k)$ – функция сопротивления сети, Ом.

Импеданс сети на основной гармонике определяется по выражению [10]

$$Z_{\text{С}} = \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{КЗ}}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{Н}}$ – номинальное фазное напряжение, В; $S_{\text{КЗ}}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения ФКУ, ВА.

При отсутствии точных данных о комплексном сопротивлении сети рекомендуется использовать соотношение активной R и реактивной X составляющих как 9:1. Это упрощает моделирование, но требует последующей верификации при наличии экспериментальных измерений [8].

Основная задача проектирования ФКУ – снижение коэффициента гармонических искажений K_U до значений, регламентированных стандартами (например, ГОСТ 32144-2013). Для математической формализации процесса в среде Mathcad вводится целевая функция

$$K_U(Q_1...Q_n) = \frac{100}{U_H}\sqrt{\sum_{k=2}^{m} Z(k,Q_1...Q_n)\, I_k}, \quad (3)$$

где $Z(k,Q_1...Q_n)$ – импеданс системы «сеть–ФКУ» на k-й гармонике, Ом; I_k – ток k-й гармоники, А.

Каждое слагаемое $Z(k)\, I_k$ отражает вклад гармоники в общие искажения. Алгоритмизация расчета по формуле (3) упрощает анализ за счет автоматизации операций с матрицами и векторами в Mathcad.

Минимизация $K_U(Q_1...Q_n)$ выполняется методом поиска глобального экстремума в заданной области допустимых значений. Допустимые значения задаются некоторым ограничением, в данном случае суммарной мощностью отдельных звеньев ФКУ.

Заключительным этапом выбора параметров фильтра является расчет отдельных элементов каждого звена ФКУ: емкости C; индуктивности L; сопротивления R.

В рамках исследования эффективности ФКУ проведен мониторинг показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на сельскохозяйственном машиностроительном заводе. Исходные данные для расчетов:

– однолинейная схема электроснабжения предприятия;

– мощность короткого замыкания в точке измерений $S_{КЗ}$ = 124 МВА;

– параметры силового трансформатора ТДНС-16000-35/6,3 с U_K = 9,78 %.

Ключевым источником гармонических составляющих тока оказался разгоночно-балансировочный стенд, используемый для тестирования валов и их балансировки. Его силовая часть состояла из двух двигателей постоянного тока, которые при работе на предельных нагрузках (раскрутка крупногабаритных деталей) провоцировали:

– повреждение импульсных блоков питания;

– сбои в функционировании офисного оборудования.

Эти симптомы подтвердили наличие значительных гармонических искажений в сети.

Измерения выполнялись в распределительном устройстве 6 кВ с использованием:

– анализатора качества электроэнергии Hioki PW3198;

– изолированных токовых клещей Hioki-9695 (диапазон 5 А).

Программа мониторинга предусматривала:

– продолжительность: 1 ч с вариацией режимов работы стенда;

– интервал усреднения данных: 1 с.

Короткий интервал усреднения обеспечил высокую детализацию и точность оценки динамических изменений параметров.

Результаты исследования. На основании данных мониторинга трехфазных нагрузок (см. таблицу) установлено, что потребляемая мощность характеризуется значительной нестабильностью: пиковые значения достигают 7 МВА, а коэффициент мощности $\cos\varphi$ варьируется от 0,00 до 0,69. Это существенно ниже нормативного уровня 0,93, что указывает на критическую необходимость внедрения мероприятий по компенсации реактивной мощности.

Низкое значение коэффициента мощности демонстрирует низкую эффективность преобразования энергии. Систематическая перегрузка сети реактивными токами увеличивает потери в кабелях и трансформаторах.

Значение мощностей и cosφ в точке замеров

Мощность	*P*, кВт	*S*, кВА	*Q*, кВАр	cosφ	Нормированное значение cosφ
Максимальное значение	4 740,00	7 330,00	7 210,00	0,69	0,93
Среднее значение	2 396,02	6 558,20	5 964,06	0,36	
Минимальное значение	0,00	40,00	40,00	0,00	

В результате анализа спектра напряжения (рис. 1) установлено, что суммарный коэффициент гармонических искажений K_U достигает 13,17 %, а в 70 % временных интервалов превышает 8 %. Это нарушает требования ГОСТ 32144-2013, согласно которому допустимый уровень K_U не должен превышать 8 % для сетей с преобладанием нелинейных нагрузок.

Анализ значений частных коэффициентов $K_{U(n)}$ показывает, что большая часть коэффициентов достигает значений, которые они, согласно ГОСТ 32144-2013, не должны превышать в течение 100 % времени. Для коррекции cosφ до нормативных 0,93 рассчитана потребность в реактивной мощности, которая составляет до 5 860 кВАр в пиковые периоды.

Для корректного подбора параметров звеньев ФКУ – частоты настройки *s* и добротности *d* – необходимо провести анализ частотного спектра тока нагрузки (рис. 2). Исследование показало, что доминирующими являются 5-я и 11-я гармоники, а общий спектр соответствует структуре $6n \pm 1$, что характерно для шестипульсных выпрямительных установок.

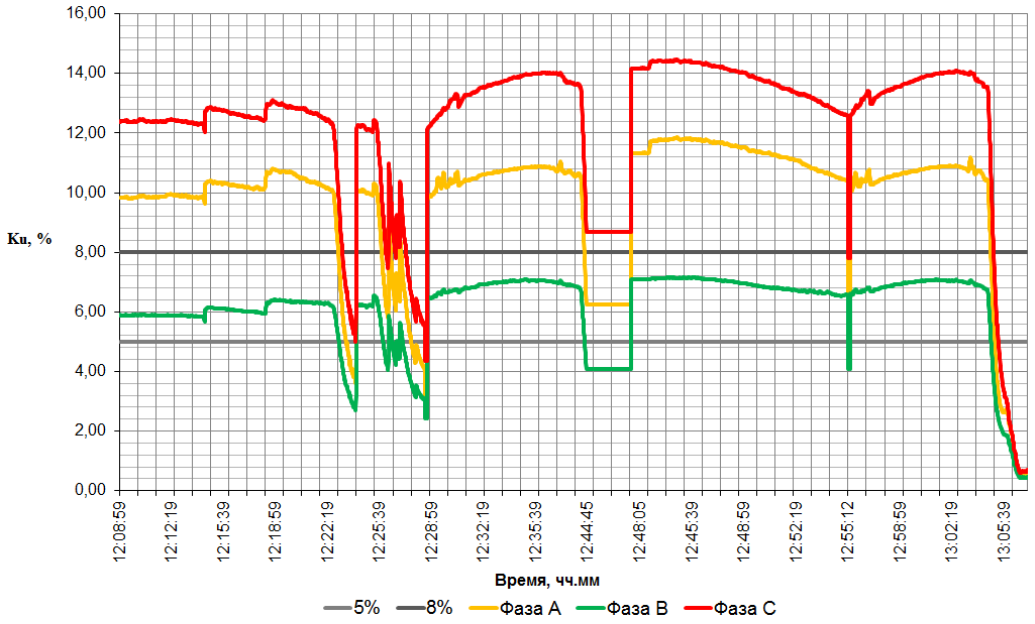

Рис. 1. Значения фазных коэффициентов K_U

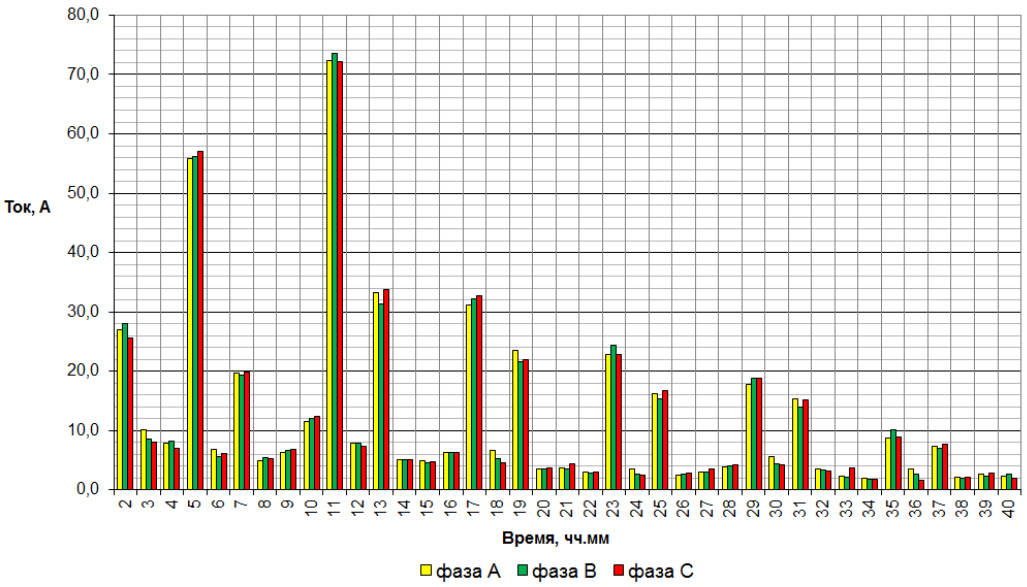

Рис. 2. Частотный спектр тока нагрузки

Выбирая количество звеньев ФКУ, нужно ориентироваться на величину преобладающих гармоник, а также на частотное распределение. В данном случае наиболее целесообразными являются два варианта:

1) узкополосный фильтр (5-я гармоника) в сочетании с широкополосным фильтром (7-я гармоника): такой вариант предотвращает резонансные явления на частотах доминирующих гармоник, однако эффективность широкополосного фильтра для подавления 11-й гармоники ограничена из-за снижения мощности на частотах, удаленных от частоты настройки s;

2) узкополосный фильтр (5-я гармоника) в сочетании с широкополосным фильтром (11-я гармоника): такой вариант обеспечивает подавление двух наиболее интенсивных гармоник, но создает риск резонанса в диапазоне 5–11-й гармоник, что может усилить искажения напряжения.

Таким образом, оптимальная конфигурация ФКУ должна балансировать между эффективностью подавления гармоник и предотвращением побочных резонансных эффектов, что достигается за счет комбинации узко- и широкополосных решений.

При сравнении двух конфигураций ФКУ – с настройкой на 5-ю и 11-ю гармоники, а также на 5-ю и 7-ю – установлено, что первый вариант демонстрирует более низкие значения суммарного коэффициента искажений K_U: 2,38; 2,80; 2,37. Это объясняется эффективным подавлением доминирующей 11-й гармоники, которая имеет наибольшую амплитуду в спектре нагрузки. Однако данный подход сопровождается побочными эффектами: между частотами настройки фильтров возникают резонансные явления, что приводит к росту коэффициентов $K_{U(4)}$ и $K_{U(6)}$ выше норм ГОСТ 32144-2013.

При использовании фильтров, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники, значения K_U выше (3,32; 2,89; 3,07), но частные коэффициенты $K_{U(n)}$ остаются в допустимых пределах. Это связано с тем, что широкополосный фильтр, настроенный на 7-ю гармонику, обеспечивает более равномерное распределение сопротивления в диапазоне средних частот, снижая риск резонансов.

Вариант с настройкой на 5-ю и 7-ю гармоники предпочтителен в условиях жестких требований к качеству электроэнергии, несмотря на относительно высокие значения K_U.

Эффективность ФКУ определяется не только настройкой на гармоники, но и типом используемых широкополосных звеньев. По результатам моделирования (рис. 3) наибольшую компенсационную способность демонстрирует комбинированный фильтр:

– узкополосное звено, настроенное на 5-ю гармонику;

– широкополосное звено 3-го порядка, оптимизированное для 7-й гармоники.

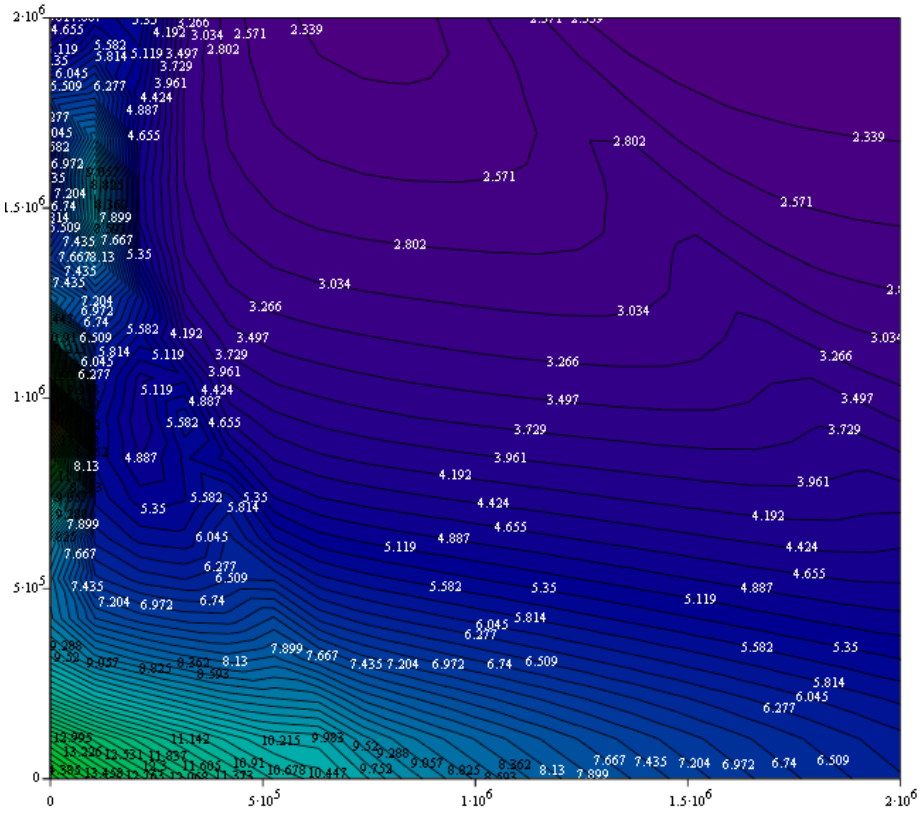

Рис. 3. График поверхности для функции $K_U(Q_1, Q_2)$ при расчете узкополосного фильтра и широкополосного фильтра 3-го порядка

График поверхности $K_U(Q_1, Q_2)$ показывает прямую корреляцию между реактивной мощностью фильтра и уровнем подавления гармоник. При этом наблюдается следующее:

– увеличение Q_1 и Q_2 снижает K_U до 2,3–2,8 %;

– минимальная эффективность наблюдается при $Q < 100$ кВАр, что связано с недостаточной компенсацией реактивной составляющей.

При малых значениях реактивной мощности нагрузки пассивные ФКУ теряют целесообразность:

– из-за невозможности подавления высокочастотных гармоник без риска резонанса;

– низкой экономической эффективности при малых Q.

В таких случаях оптимальным решением становятся активные фильтры гармоник (АФГ), которые обладают следующими функциями:

– динамически адаптируются к изменению спектра нагрузки;

– подавляют гармоники в диапазоне 2–50 кГц без риска резонансных явлений.

Выводы. В результате оптимизации двух конфигураций фильтрокомпенсирующих устройств для предприятия с нелинейными нагрузками, проведенной с применением усовершенствованной методики расчета, реализованной в среде Mathcad, установлено, что оптимальным решением является гибридная система, включающая:

– узкополосный фильтр, настроенный на 5-ю гармонику (подавление доминирующей составляющей спектра);

– широкополосный фильтр 3-го порядка с частотой настройки 7-й гармоники (компенсация среднечастотных искажений).

Преимуществами выбранной конфигурации являются:

1) минимизация активных потерь за счет оптимального распределения мощности между звеньями, что соответствует критериям энергоэффективности;

2) снижение гармоник на 70–80 % (узкополосный фильтр эффективно гасит 5-ю гармонику, а широкополосный обеспечивает равномерную коррекцию спектра в диапазоне 5–13-й гармоник);

3) отсутствие резонансных рисков (частотная адаптация звеньев исключает перекрытие полос пропускания), что подтверждается расчетами амплитудно-частотных характеристик.

Методика позволяет адаптировать параметры ФКУ под конкретный объект, что особенно актуально для предприятий с переменным профилем потребления, например для предприятий сельскохозяйственного машиностроения.

Список литературы

1. **On the efficiency** of power transformers with “star-zig-zag with zero” winding connection scheme in rural electricity networks supplying household consumers / Y.I. Hanin, O.V. Rodionova, A.P. Panchishkin, et al. // Journal of Physics: Conference Series: 2, Volgograd, 06–07 мая 2021 г. – Volgograd, 2021. – P. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2060/1/012004. – EDN KKUQUD.

2. **Юндин М.А., Ханин Ю.И.** О дополнительных потерях электроэнергии в сети 0,38 кВ // Вестник ВИЭСХ. – 2013. – № 4(13). – С. 27–29. – EDN RLYAWP.

3. **Костинский С.С.** Обзор и результаты исследований гармонического состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 27–42. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42. – EDN YYPEIF.

4. **Юндин М.А., Шабанов Н.И., Ханин Ю.И.** О коэффициенте небаланса наиболее значимых высших гармоник токов в сельских коммунально-бытовых сетях 0,38 кВ // Вестник АПК Ставрополья. – 2014. – № 2(14). – С. 102–104. – EDN SHWLVZ.

5. **Тигунцев С.Г., Шафаревич К.В.** Разработка мероприятий по устранению резонансных явлений на частотах высших гармоник на линии электропередачи 35 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 40–50. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.040-050. – EDN EBBTCK.

6. **Юндин М.А., Юндин К.М., Исупова А.М.** Влияние трансформатора с обмотками «двойной зигзаг с нулевым выводом» на уровень несимметрии и несинусоидальности токов в сети 0,38 кВ // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 77–82. DOI: 10.53891/00135860_2023_11_77. – EDN XNPJCY.

7. **The additional** power losses investigation in electric power transformers 10/0,4 kW of rural electrical networks / Yu.I. Hanin, O.A. Ivanova, T.P. Brenina, et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1069, No. 1. – P. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/1069/1/012036. – EDN QOLWPF.

8. **Analysis** of the harmonic composition of current in the zero-working wire at the input of the load node with the prevailing non-linear power consumers / I.V. Yudaev, M.A. Yundin, A.M. Isupova, et al. // Archives of Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 70, No. 2. – P. 463–473. DOI: 10.24425/aee.2021.136996. – EDN NPLGLV.

9. **Вагин Г.Я., Куликов А.Л.** Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля // Электрические станции. – 2019. – № 6(1055). – С. 54–59. – EDN IHAYFR.

10. **Ханин Ю.И., Пелих А.Э., Толочко И.В.** Исследование показателей качества электроэнергии на сельскохозяйственном машиностроительном заводе // Актуальные проблемы молодежной науки в развитии АПК: материалы Всерос. (национальной) науч.-практ. конф., Курск, 11–13 декабря 2019 г. Ч. 1. – Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия им. профессора И.И. Иванова, 2020. – С. 371–376. – EDN XSQQIU.

References

1. Hanin, Y.I., Rodionova, O.V., Panchishkin, A.P., Zaichkina, M.A., Shakhbazova, Y.E. On the efficiency of power transformers with “star-zig-zag with zero” winding connection scheme in rural electricity networks supplying household consumers. *Journal of Physics: Conference Series 2, Volgograd, Virtual, 06–07 мая 2021 года*.

Volgograd, Virtual, 2021, p. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2060/1/012004. EDN KKUQUD.

2. Yundin, M.A., Khanin, Yu.I. O dopolnitel'nykh poteryakh elektroenergii v seti 0,38 kV [On additional losses of electricity in the 0,38 kV network]. *Vestnik VIESKh*, 2013, no. 4(13), pp. 27–29. EDN RLYAWP.

3. Kostinskiy, S.S. Obzor i rezul'taty issledovaniy garmonicheskogo sostava toka, potreblyaemogo preobrazovatelyami chastoty maloy moshchnosti, a takzhe sposobov i ustroystv dlya snizheniya ikh negativnogo vliyaniya na sistemy elektrosnabzheniya [Review and results of studies of the harmonic composition of current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 27–42. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42. EDN YYPEIF.

4. Yundin, M.A., Shabanov, N.I., Khanin, Yu.I. O koeffitsiente nebalansa naibolee znachimykh vysshikh garmonik tokov v sel'skikh kommunal'no-bytovykh setyakh 0,38 kV [On the imbalance coefficient of the most significant higher harmonics of currents in rural public utility networks]. *Vestnik APK Stavropol'ya*, 2014, no. 2(14), pp. 102–104. EDN SHWLVZ.

5. Tiguntsev, S.G., Shafarevich, K.V. Razrabotka meropriyatiy po ustraneniyu rezonansnykh yavleniy na chastotakh vysshikh garmonik na linii elektroperedachi 35 kV [Development of measures to eliminate resonant phenomena at higher harmonic frequencies on power line of 35 kV]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 40–50. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.040-050. EDN EBBTCK.

6. Yundin, M.A., Yundin, K.M., Isupova, A.M. Vliyanie transformatora s obmotkami «dvoynoy zigzag s nulevym vyvodom» na uroven' nesimmetrii i nesinusoidal'nosti tokov v seti 0,38 kV [The influence of a transformer with “double zigzag with zero terminal” windings on the level of asymmetry and non-sinusoidality of currents in a 0,38 kV network]. *Elektrotekhnika*, 2023, no. 11, pp. 77–82. DOI: 10.53891/00135860_2023_11_77. EDN XNPJCY.

7. Hanin, Yu.I., Ivanova, O.A., Brenina, T.P., Petruhin, V.A., Chernousov, P.S. The additional power losses investigation in electric power transformers 10/0,4 kW of rural electrical networks. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, vol. 1069, no. 1, p. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/1069/1/012036. EDN QOLWPF.

8. Yudaev, I.V., Yundin, M.A., Isupova, A.M., Rud, E.V., Ponomarenko, T.Z. Analysis of the harmonic composition of current in the zero-working wire at the input of the load node with the prevailing non-linear power consumers. *Archives of Electrical Engineering*, 2021, vol. 70, no. 2, pp. 463–473. DOI: 10.24425/aee.2021.136996. EDN NPLGLV.

9. Vagin, G.Ya., Kulikov, A.L. Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya. Analiz sostoyaniya metodov normirovaniya i kontrolya [Quality of electrical energy in power supply systems. Analysis of the state of methods of regulation and control]. *Elektricheskie stantsii*, 2019, no. 6(1055), pp. 54–59. EDN IHAYFR.

10. Khanin, Yu.I., Pelikh, A.E., Tolochko, I.V. Issledovanie pokazateley kachestva elektroenergii na sel'skokhozyaystvennom mashinostroitel'nom zavode [Study of indicators of quality of electric power at agricultural machinery manufacturing plant]. *Materialy Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii “Aktual'nye problemy molodezhnoy nauki v razvitii APK”, Kursk, 11–13 dekabrya 2019 g.* [Proceedings of the All-Russian (national) scientific and practical conference “Current issues of youth science in the development of the agro-industrial complex”, Kursk, December 11–13, 2019]. Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya selskokhozyaystvennaya akademiya im. professora I.I. Ivanova, 2020, part 1, pp. 371–376. EDN XSQQIU.