

КОНДУКТИВНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ ПО СУММАРНОМУ КОЭФФИЦИЕНТУ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ БЕРЕГОВЫХ ОБЪЕКТОВ ОМСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ

Антонов Александр Игоревич

кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники и
электрооборудования
Омского института водного транспорта –
филиала Сибирского государственного
университета водного транспорта,
Омск, Россия
E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

Руди Дмитрий Юрьевич

старший преподаватель
кафедры электротехники и электрооборудования
Омского института водного транспорта –
филиала Сибирского государственного
университета водного транспорта,
Омск, Россия
E-mail: dima_rudi@mail.ru

Руппель Александр Александрович

кандидат технических наук,
профессор кафедры электротехники
и электрооборудования
Омского института водного транспорта –
филиала Сибирского государственного
университета водного транспорта,
Омск, Россия
E-mail: elektrotex@mail.ru

Хацевский Константин Владимирович

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электротехники и
электрооборудования
Омского института водного транспорта –
филиала Сибирского государственного
университета водного транспорта,
Омск, Россия
E-mail: xkv-post@rambler.ru

Электромагнитная совместимость (ЭМС) линий электропередачи различного напряжения с техническими средствами, в том числе и между собой, представляет глобальную проблему в электроэнергетике. Современное состояние электроэнергетики России таково, что приоритетным является строительство не только новых объектов, но и реконструкция и модернизация существующих. В связи с этим возрастает актуальность изучения электромагнитной обстановки (ЭМО), определения кондуктивных электромагнитных помех (ЭМП) в действующих электрических сетях и обеспечения ЭМС технических средств путем подавления кондуктивных ЭМП.

Предмет исследования: процессы проникновения кондуктивных ЭМП, обусловленных нестандартными (определённые по усреднённым значениям) показателями КЭ.

Цель исследования: разработка положений и рекомендаций, позволяющих обеспечить ЭМС электрических сетей береговых объектов при гармоническом воздействии.

Объект исследования: электрические сети среднего и высокого напряжения береговых объектов Омского Прииртышья.

CONDUCTIVE LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE BY THE TOTAL HARMONIC FACTOR OF VOLTAGE COMPONENTS IN ELECTRIC NETWORKS OF SHORE FACILITIES OF THE OMSK IRTYSH REGION

Alexander I. Antonov

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Electrical
Engineering and Electrical Equipment
of Omsk Institute of Water Transport – branch
of the Siberian State University of Water Transport,
Omsk, Russia
E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

Dmitry Y. Rudi

Senior Lecturer,
Department of Electrical Engineering
and Electrical Equipment
of Omsk Institute of Water Transport – branch
of the Siberian State University of Water Transport,
Omsk, Russia
E-mail: dima_rudi@mail.ru

Alexander A. Ruppel

Candidate of Technical Sciences,
Professor of the Department of Electrical Engineering
and Electrical Equipment
of Omsk Institute of Water Transport – branch
of the Siberian State University of Water Transport,
Omsk, Russia
E-mail: elektrotex@mail.ru

Konstantin V. Khatsevsky

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Professor of the Department of Electrical Engineering
and Electrical Equipment
of Omsk Institute of Water Transport – branch
of the Siberian State University of Water Transport,
Omsk, Russia
E-mail: xkv-post@rambler.ru

Electromagnetic compatibility (EMC) of power lines of different voltages with technical means, including among themselves, is a global problem in the electric power industry. The current state of the electric power industry in Russia is such that the priority is the construction of not only new facilities, but also the reconstruction and modernization of existing ones. In this regard, the relevance of studying the electromagnetic environment (EME), determining conductive electromagnetic interference (EMI) in existing electrical networks and ensuring EMC of technical equipment by suppressing conductive EMI increases.

Subject of research: are the processes of penetration of conductive EMI caused by non-standard (determined by average values) indicators of KE.

Purpose of research: development of provisions and recommendations to ensure EMC of electrical networks of coastal facilities under harmonic influence.

Objects of research: medium and high voltage electrical networks of coastal facilities of the Omsk Irtysh region.

Research findings: based on the conducted studies, it is shown that the proposed method allows ensuring EMC of electrical networks of coastal facilities under harmonic influence.

Keywords: quality of electrical energy, electrical network, harmonic influence, non-sinusoidality of voltages, higher harmonics.

Результаты исследования: на основе проведенных исследований показано, что предложенная методика позволяет обеспечить ЭМС электрических сетей береговых объектов при гармоническом воздействии.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрическая сеть, гармоническое воздействие, несинусоидальность напряжений, высшие гармоники.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ЭМС технических средств в отдельных регионах Сибири с мощным водным транспортом в настоящее время обострилась по объективным причинам из-за спада производства военно-промышленного комплекса и, наоборот, подъема производства в отдельных районах, где ощущается дефицит электрической энергии. В этих регионах изменился баланс электрической мощности и, как следствие, произошло изменение интегрального показателя региональных электроэнергетических систем (ЭЭС) мощности трехфазного короткого замыкания (КЗ). Это вызвало усиление влияния нелинейной (искажающей) нагрузки в основном предприятий тяжелой промышленности и электрифицированного железнодорожного транспорта, работающего в предельных режимах, на электрические сети различного напряжения [1–3].

Наиболее подверженным гармоническому воздействию на водном транспорте являются электрические сети и электрооборудование транспортных терминалов (речные порты) по переработке грузов совместно с электрифицированным железнодорожным транспортом. Искажение формы кривой напряжения в питающей сети вызывает:

- нарушение нормальной работы устройств релейной защиты, автоматики и связи;
- интенсивное старение изоляции электроустановок и кабельных сетей;
- уменьшение коэффициента мощности и увеличение потерь электрической энергии из-за отказов конденсаторов, применяемых для компенсации реактивной мощности на порталных кранах;
- увеличение тока замыкания на землю и снижение надежности работы сетей 10 кВ, обусловленное увеличением случаев однофазных замыканий на землю и переходом их в двух- и трехфазные КЗ [4].

Исследования ученых охватывают различные аспекты обеспечения ЭМС технических средств в электрических сетях [5–12]. Для электрических сетей от 10 до 110 кВ береговых объектов водного транспорта наиболее важной задачей является обеспечение регламентируемых ГОСТ 32144-2013 уровней ЭМС технических средств по суммарному коэффициенту гармонических составляющих

напряжений. Для этого необходимо подавить кондуктивные ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжений [1, 13].

Проведен ретроспективный анализ основных источников кондуктивных ЭМП, обусловленных несинусоидальностью токов и напряжений, которыми являются вентильные преобразователи, применяемые в промышленности, на электрифицированном железнодорожном транспорте и в нефтедобывающей отрасли [14–16]. Это обусловило выбор данных устройств для анализа влияния нелинейной нагрузки на качество электроэнергии в сетях от 10 до 110 кВ и определения параметров распределения кондуктивных ЭМП в ЭЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании ретроспективного анализа методов исследования ЭМО в сетях, подверженных гармоническому воздействию, выбран алгоритм расчета кондуктивных ЭМП по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения, основанный на использовании экспериментальных исследований показателей (КЭ) [17–19].

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений искажения связан с полем событий и характеризуется таблицей вероятностей [20]

$$\left(\begin{matrix} K_{U1}; K_{U2}; K_{U3}; \dots; K_{Un} \\ P_1; P_2; P_3; \dots; P_n \end{matrix} \right), \quad (1)$$

где $K_{U1}; K_{U2}; K_{U3}; \dots; K_{Un}$ – различные значения K_U в течение суток;

$P_1; P_2; P_3; \dots; P_n$ – вероятность появления значений K_U .

При превышении нормально допустимого значения коэффициента $K_{U,H}$ часть поля событий (1) обуславливает кондуктивную ЭМП, вызванную особенностями технологического процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Достоверное значение этой кондуктивной ЭМП может быть определено только статистическими методами, а процесс её возникновения представляется математической моделью

$$K_U [P(K_{U,H} \leq K_U \leq K_{U,л}) > 0,05; P(K_{U,л} < K_U < \infty) \neq 0] \subset \delta K_U, \quad (2)$$

где δK_U – кондуктивная ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжений, %; $K_{U,n}$ и $K_{U,n}$ – соответственно нормально и предельно допустимые значения K_U , обусловленные величиной номинального напряжения в сети.

Таким образом, кондуктивная ЭМП δK_U появляется в сети тогда, когда вероятность нахождения K_U в течение суток в пределах $(K_{U,n}; K_{U,n})$ превышает 0,05, а в пределах $(K_{U,n}; \infty)$ не равна нулю. Эта кондуктивная ЭМП появляется также при выполнении только одного условия, является производящей функцией непрерывно распределенной случайной величины K_U .

Интегральные функции распределения в интервалах $(K_{U,n}; K_{U,n})$ и $(K_{U,n}; \infty)$ определяются соответственно по формулам

$$P(K_{U,n} \leq K_U \leq K_{U,n}) = \int_{K_{U,n}}^{K_{U,n}} \varphi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\} d(K_U), \quad (3)$$

$$P(K_{U,n} < K_U < \infty) = \int_{K_{U,n}}^{\infty} \varphi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\} d(K_U), \quad (4)$$

где $\varphi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\}$ – плотность вероятности распределения величины K_U , 1/%; $M[K_U]$ – математическое ожидание, %; $\sigma[K_U]$ – среднее квадратическое отклонение, %.

Кондуктивная ЭМП как производящая функция обладает на основании теоремы о равенстве начальных моментов и следствия о равенстве центральных моментов свойствами [1]:

$$M[K_U] = M[\delta K_U], \quad \sigma[K_U] = \sigma[\delta K_U],$$

а на основании следствия из теоремы единственности и теоремы непрерывности теории производящих функций характеризуется равенством

$$\varphi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\} = \varphi\{\delta K_U, M[\delta K_U], \sigma[\delta K_U]\}. \quad (5)$$

Приведены результаты измерений коэффициента K_U в сети 110 кВ общего назначения

Омского Прииртышья, в сети 35 кВ Омского судоремонтного завода и в сети 10 кВ Омского речного порта [1, 4, 7, 12, 21–23].

Методами математической статистики показано, что в сети 110 кВ распределение K_U определяется по формуле

$$\varphi\{K_U; 2,25; 0,69\} = 0,58 \exp\left[-\frac{(K_U - 2,25)^2}{0,95}\right]. \quad (6)$$

Результаты измерений в сетях 10; 35 кВ обрабатывались на персональном компьютере по специальной программе. Коэффициенты K_U также следуют нормальному закону распределения теории вероятностей. Плотности вероятностей распределения K_U в этих сетях определяются соответственно по формулам

$$\varphi\{K_U; 3,31; 0,78\} = 0,51 \exp\left[-\frac{(K_U - 3,31)^2}{1,2}\right], \quad (7)$$

$$\varphi\{K_U; 5,63; 1,5\} = 0,27 \exp\left[-\frac{(K_U - 5,63)^2}{4,5}\right]. \quad (8)$$

Вычисления определенных интегралов (3) и (4) производились с помощью функции Лапласа.

Вероятность появления кондуктивной ЭМП δK_U в сети определяется по формуле

$$P(\delta K_U) = P(K_{U,n} \leq K_U \leq K_{U,n}) + P(K_{U,n} < K_U < \infty) - 0,05. \quad (9)$$

Выполненные исследования показали, что в сети 110 кВ действует кондуктивная ЭМП δK_U (рисунок 1), которая характеризуется нормальной плотностью вероятности распределения с параметрами $M[\delta K_U] = 2,25\%$, $\sigma[\delta K_U] = 0,69\%$ и вероятностью появления $P[\delta K_U] = 0,59$. Сети 35 кВ и 10 кВ соответственно имеют $M[\delta K_U] = 3,31\%$, $\sigma[\delta K_U] = 0,78\%$, $P[\delta K_U] = 0,08$; $M[\delta K_U] = 5,63\%$, $\sigma[\delta K_U] = 1,5\%$, $P[\delta K_U] = 0,61$.

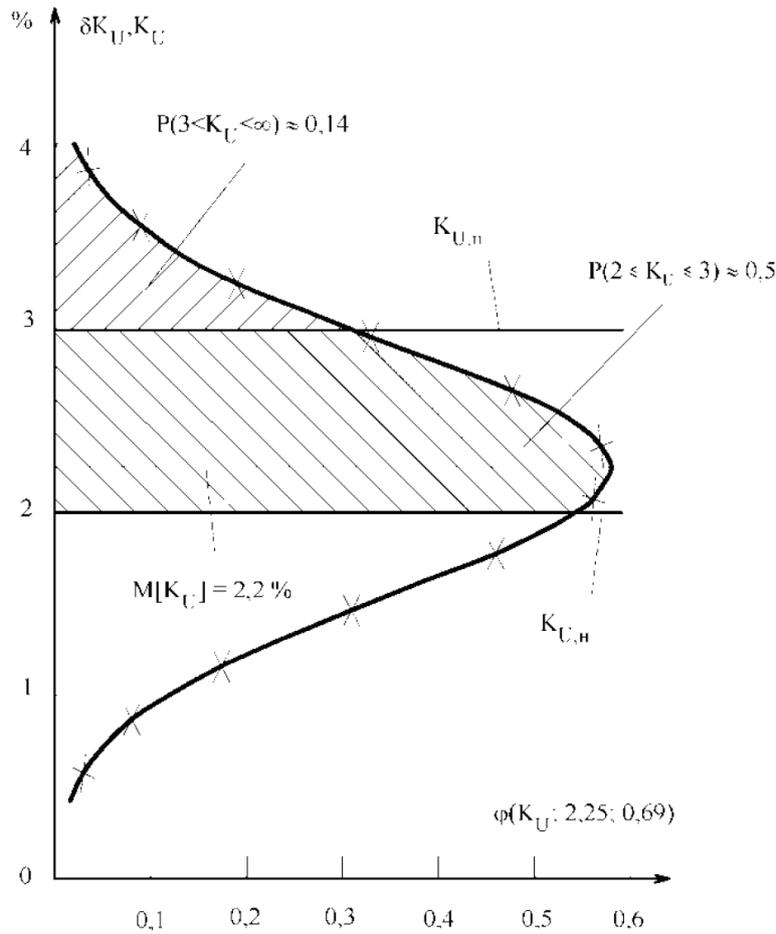


Рисунок 1. График нормальной плотности вероятности распределения $\varphi(K_U; 2,25; 0,69)$, совмещенный с нормируемыми значениями уровней ЭМС в электрической сети 110 кВ

Таким образом, установлено, что в рассматриваемых электрических сетях 10; 35; 110 кВ береговых объектов водного транспорта необходимо подавить кондуктивные ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения.

Информация о коэффициенте K_U в различных сетях ЭЭС, имеющей нелинейную нагрузку, получена путем прямых измерений и расчетов. В связи с тем, что источниками гармонических искажений в сетях от 10 до 110 кВ Омского Прииртышья являются вентильные преобразователи, выбрана математическая модель, позволяющая определить гармоническое воздействие группы этих преобразователей

$$K_{UN} = \sqrt{K_{U\Sigma 1}^2 + K_{U\Sigma 2}^2 + \Lambda K_{U\Sigma i}^2 + \Lambda + K_{U\Sigma n}^2}, \quad (10)$$

где $K_{U\Sigma 1}, K_{U\Sigma 2}, K_{U\Sigma i}, K_{U\Sigma n}$ – соответственно суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжений, обусловленные работой группы одинаковых преобразователей. Значения этих коэффициентов определялись по формуле [1]

$$K_{U\Sigma i} = \frac{S_{Ti}}{S_k} \left[\frac{3}{\pi} \frac{6}{m} \frac{N_i K_{zi} \sqrt{1 - (\chi_i / K_{mi})}}{(S_{Ti} / S_k) + u_{ki} + x_{np}} \right]^{0,5}, \quad (11)$$

где S_{Ti}, K_{zi}, u_{ki} – соответственно мощность, коэффициент загрузки по полной мощности и напряжение КЗ i -го преобразовательного трансформатора; χ_i, K_{mi} – соответственно коэффициенты мощности и искажения; N_i – количество преобразователей в i -й группе; S_k – мощность 3-фазного КЗ в исследуемой точке ЭЭС; m – число фаз схемы преобразования; x_{np} – индуктивное сопротивление цепи в относительных единицах, приведенной к S_{Ti} , от преобразовательного трансформатора до точки, в которой определяется $K_{\Sigma i}$.

Гармонический анализ позволил определить критерий распределения кондуктивной ЭМП по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжений в сетях ЭЭС. При гармоническом воздействии со стороны сети более низкого напряжения имеем

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{S_{k,п}}{S_{k,пр}}}, \quad (12)$$

где $S_{k,н}$, $S_{k,в}$ – соответственно мощность трехфазного КЗ в сети низкого и высокого напряжения.

Если воздействие оказывается со стороны более высокого напряжения, то критерий обозначается λ' . Значения величины λ и λ' ,

рассчитанные из условий ЭМС сетей низкого и высокого напряжения, приведены на рисунке 2 [1, 24]. Например, если источник высших гармоник находится в сети 0,4 кВ, то чтобы исключить его влияние на сеть от 6 до 20 кВ, необходимо выдержать неравенство $\lambda < 0,79$.

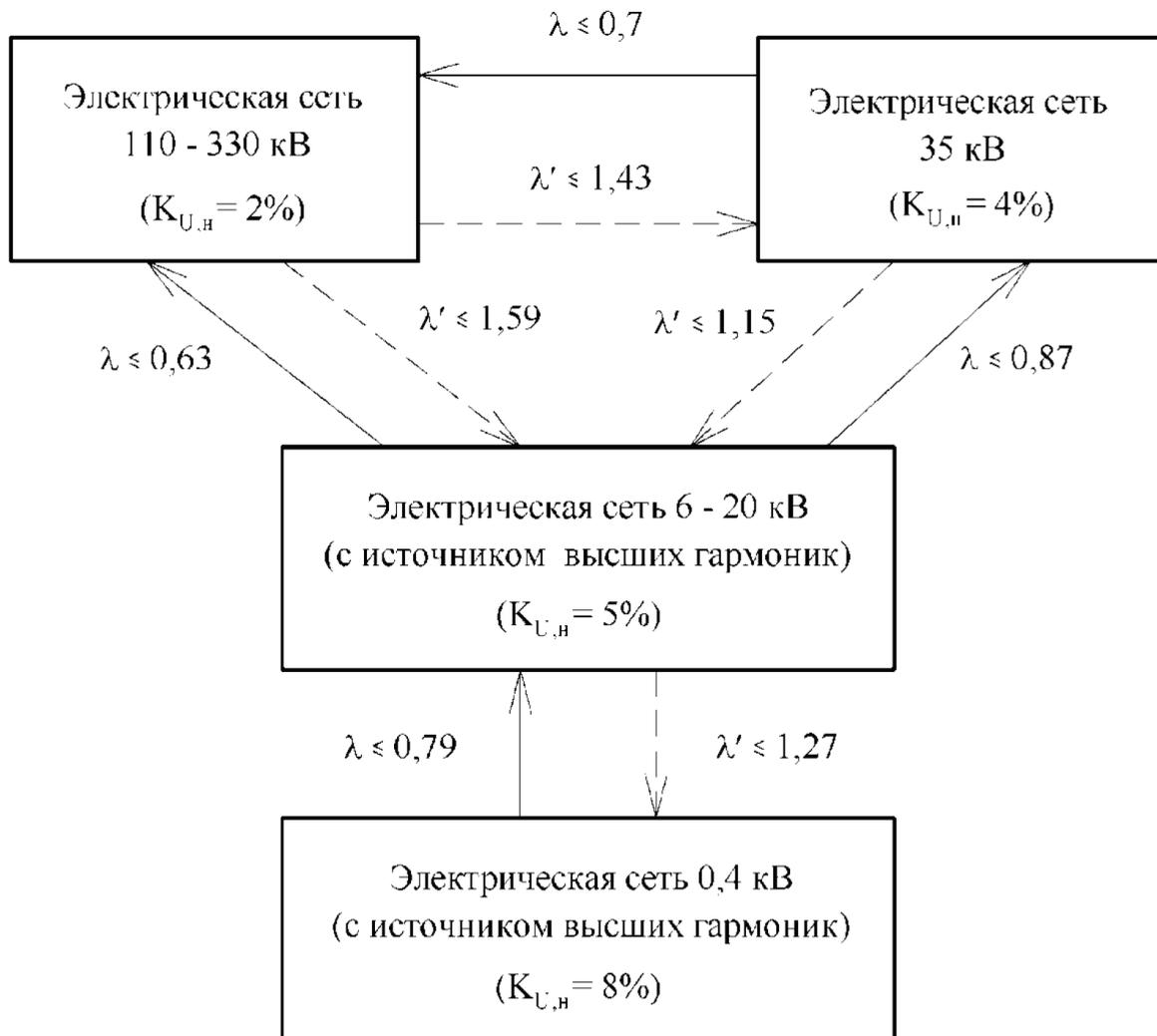


Рисунок 2. Механизм распространения кондуктивной ЭМП в электроэнергетической системе

На основании теории вероятностей и математической статистики, которые представляют наиболее подходящие методы при исследовании процессов, испытывающих влияние случайных факторов, и теоретических основ кондуктивных ЭМП в ЭЭС, распространяющихся по сетям, разработан алгоритм подавления кондуктивных ЭМП δK_U [25–27]. В соответствии с ним на графике нормальной

плотности вероятности распределения $\varphi\{K_U, M[K_U], \sigma[K_U]\}$, совмещенном с нормируемыми значениями уровней ЭМС, характерными для величины напряжения сети (рисунок 3, кривая 1), размещается этот же график с таким расчетом, чтобы вероятность появления величины K_U в интервале ($K_{У,н}$; $K_{У,в}$) не превышала установленного ГОСТ 32144-2013 значения 0,05 (рисунок 3, кривая 2).

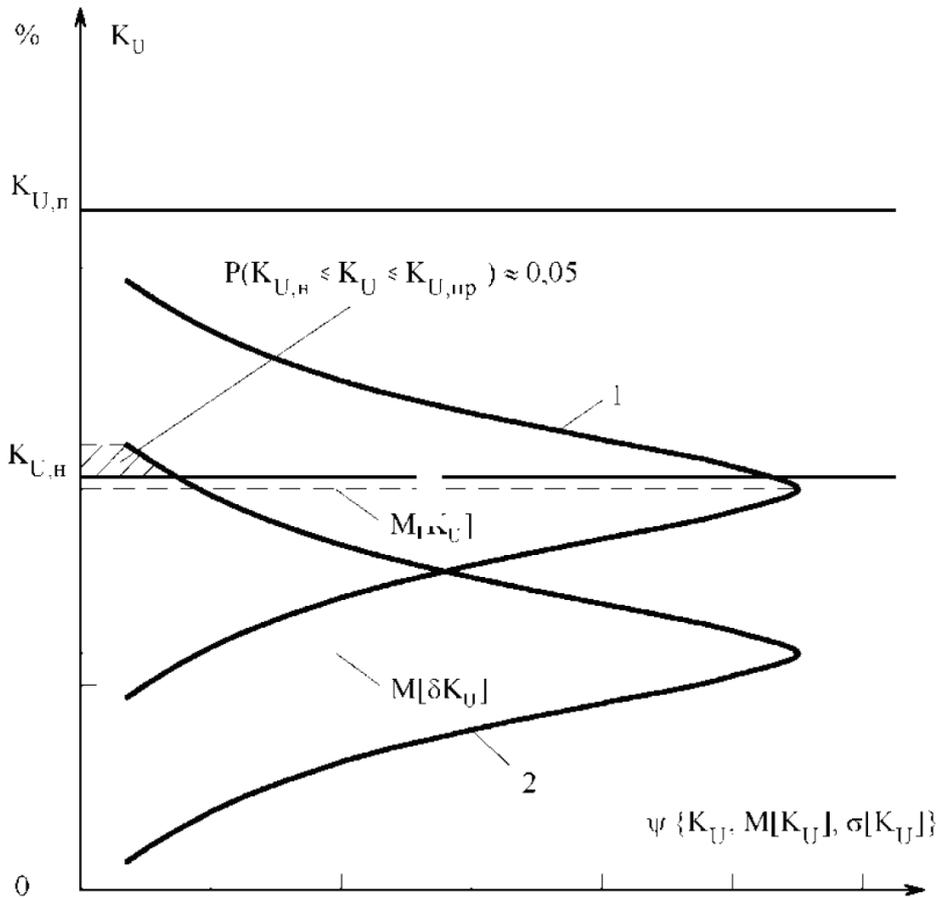


Рисунок 3. График нормальной плотности распределения коэффициента (1), совмещенный с нормируемыми уровнями ЭМС, и тот же график (2), при котором обеспечивается подавление кондуктивной ЭМП

Определяется математическое ожидание $M[\delta K_U]$. Вычисляется величина

$$\Delta M[K_U] = M[K_U] - M[\delta K_U], \quad (13)$$

на которую необходимо уменьшить математическое ожидание случайной величины K_U , чтобы подавить кондуктивную ЭМП δK_U в ЭЭС.

Исходя из сущности критерия распределения кондуктивной ЭМП δK_U в ЭЭС и математической модели (11) влияния нелинейной нагрузки на коэффициент K_U , определены три способа снижения величины $M[K_U]$ на величины $\Delta M[K_U]$ [1]:

1. Если имеется возможность воздействовать на суммарную мощность вентильных преобразователей $S_{n\Sigma}$ (например, путем перевода части нелинейной нагрузки на другую секцию шин РУ), то её необходимо уменьшить в K -раз. Эта величина определяется по формуле

$$K = \frac{S_{n\Sigma}}{S_k M[\delta K_U]}. \quad (14)$$

В этом случае мощность трехфазного КЗ в рассматриваемой сети $S_k = \text{const}$.

2. Если имеется возможность влиять не только на величину $S_{n\Sigma}$, но и на S_k в рассматриваемой сети, то минимальную мощность трехфазного КЗ S_k' , при которой происходит подавление δK_U , можно определить по формуле

$$S_k' = S_k \frac{M[K_U]}{n M[\delta K_U]}, \quad (15)$$

где n – возможная кратность уменьшения величины $S_{n\Sigma}$.

3. Для сетей предприятий водного транспорта по объективным причинам подавление кондуктивной ЭМП δK_U приходится осуществлять при $S_{n\Sigma} = \text{const}$, т. е. повлиять на изменение величины $S_{n\Sigma}$ не удастся. В этом случае минимальную мощность трехфазного КЗ в сети S_k'' можно определить по формуле

$$S_k'' = S_k \frac{M[K_U]}{M[\delta K_U]}. \quad (16)$$

Предложенный алгоритм позволил предложить с учетом возможностей сетей технические мероприятия по подавлению

кондуктивных ЭМП δK_U в сетях 10; 35; 110 кВ Омского Прииртышья.

Интенсивное развитие нефте- и газодобывающих отраслей промышленности Сибири обуславливает создание новых и реконструкцию старых береговых объектов водного транспорта. В связи с этим возникает задача по реконструкции и построению эффективных систем электроснабжения этих объектов.

В качестве критерия сравнительной экономической эффективности различных схем электроснабжения были приняты приведенные годовые затраты

$$Z_{\Gamma} = rK + C_{\Gamma} + Y_{\Pi} + Y_{\kappa} = \min, \quad (17)$$

где K – капитальные затраты или инвестиции, тыс. руб.; C_{Γ} – годовые эксплуатационные издержки, тыс. руб.; Y_{Π} – математическое ожидание убытков объекта от перерывов в электроснабжении, тыс. руб.; Y_{κ} – математическое ожидание убытков от кондуктивной ЭМП δK_U , тыс. руб.; r – реальная ставка дисконтирования, отн. ед. Эта величина определяется по формуле

$$r = \frac{E_n - b}{1 + b}, \quad (18)$$

где E_n – номинальная процентная ставка, которая в расчетах принимается в размерах ставки рефинансирования Центрального банка России, отн. ед.; b – средний годовой уровень инфляции, отн. ед.

Неопределенность решения этой задачи обуславливается отсутствием данных об величинах Y_{Π} и Y_{κ} . Однако при решении задачи (17) недопустимо следующее неравенство:

$$Y_{\Pi} + Y_{\kappa} \geq rK + C_{\Gamma}. \quad (19)$$

Минимальные значения математических ожиданий Y_{Π} и Y_{κ} наблюдаются в системах электроснабжения с нормальной ЭМО и нормируемыми уровнями ЭМС. Для таких систем оптимизационная задача является корректно поставленной, потому что удовлетворяет условиям:

- для всех исходных данных

$$\left. \begin{array}{l} K_i \in K, \\ C_{\Gamma i} \in C_{\Gamma}, \\ Y_{\Pi i} \in Y_{\Pi}, \\ Y_{\kappa i} \in Y_{\kappa}, \\ rK + C_{\Gamma} > Y_{\Pi} + Y_{\kappa} \end{array} \right\}, \quad (20)$$

существует решение

$$Z_{\Gamma i} \in Z_{\Gamma}; \quad (21)$$

- решение однозначно;

- задача устойчива на пространствах при номинальной процентной ставке $E_n = 0,14$ и уровне инфляции $b = 10$ %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ решения оптимизационной задачи показывает, что экономика региона, в котором находятся береговые объекты водного транспорта, не может успешно развиваться, если в его ЭЭС не обеспечивается ЭМС технических средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко, А. А. Подавление кондуктивных электромагнитных помех в электрических сетях предприятий водного транспорта : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Сидоренко. Новосибирск, 2006. – 125 с.
2. Руди, Д. Ю. Проблема качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем / Д. Ю. Руди // Омский научный вестник. – 2018. – № 3 (159). – С. 40–43.
3. К проблеме электроснабжения при некачественной электроэнергии / С. М. Асосков, М. Г. Вишнягов, Е. В. Иванова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 333–336.
4. Анализ гармонического воздействия помех на электрические сети береговых объектов водного транспорта Западной Сибири / М. Г. Вишнягов, Ю. М. Иванова, В. И. Клеутин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1. – С. 331–334.
5. Исследование высших гармоник в электрических сетях низкого напряжения / Д. Ю. Руди, А. И. Антонов, М. Г. Вишнягов [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 119–125.
6. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения / К. В. Хацевский, Ю. М. Денчик, В. И. Клеутин [и др.] // Омский научный вестник. – 2012. – № 2 (110). – С. 212–214.
7. Электромагнитная обстановка в электрических сетях предприятий водного транспорта / Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, М. Н. Романов, В. Г. Сальников // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : IX Международная научно-практическая конференция. Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева. – Нур-Султан, 2021. – С. 320–323.
8. Условие обеспечения электромагнитной совместимости сетей среднего напряжения как рецепторов / С. М. Асосков, Ю. М. Денчик, Е. В. Иванова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 250–253.
9. Обеспечение электромагнитной совместимости релейной защиты и автоматики как одно из условий создания интеллектуальной сети / Е. В. Иванова, В. Г. Сальников, Ю. М. Денчик [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3–4. – С. 147–151.

10. Глотов, А. А. Концепция повышения качества функционирования несимметричных систем электроснабжения общего назначения при гармоническом воздействии / А. А. Глотов, Ю. М. Денчик, В. Г. Сальников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3–4. – С. 172–175.
11. Электромагнитная совместимость микропроцессорных устройств в системах управления электроснабжением / О. Ю. Семенов, Е. Ю. Кислицын, В. В. Рыжаков, Ю. М. Денчик // Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России : материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара. Нижневартовск, 2018. – С. 57–60.
12. Электромагнитная совместимость береговой и судовой электрических сетей при электроснабжении судна с берега / Т. В. Ананьина, Ю. М. Денчик, Е. В. Иванова [и др.] // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. – Москва, 2023. – С. 489–495.
13. Анализ определения кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несинусоидальности кривой напряжения / А. И. Антонов, М. Г. Вишнягов, Ю. М. Денчик [и др.] // Омский научный вестник. – 2015. – № 3 (143). – С. 244–247.
14. Григорьев, А. В. Решение проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / А. В. Григорьев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2021. – Т. 13, № 5. – С. 753–763.
15. Антонов, А. И. Исследование качества электроэнергии в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями / А. И. Антонов, Д. Ю. Руди, К. В. Хацевский // Вестник Югорского государственного университета. – 2023. – № 1 (68). – С. 123–130.
16. Кислицын, Е. Ю. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи в замкнутых сетях нефте- и газодобычи / Е. Ю. Кислицын, Я. С. Шмарин // Север России: стратегии и перспективы развития : материалы II Всероссийской научно-практической конференции. Сургут, 2016. – С. 194–198.
17. Алгоритм определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения / Д. Ю. Руди, С. В. Горелов, М. Г. Вишнягов [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 33. – С. 177–194.
18. Денчик, Ю. М. Методика определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи в электрической сети при гармоническом воздействии / Ю. М. Денчик // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 218–221.
19. Романов, М. Н. Обеспечение качественного функционирования электрических сетей среднего напряжения с распределённой генерацией как рецепторов в регионах с суровым климатом : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / М. Н. Романов. – Новосибирск, 2024. – 205 с.
20. Денчик, Ю. М. Определение параметров поля событий в электрических сетях при сложной электромагнитной обстановке / Ю. М. Денчик // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 2. – С. 418–424.
21. Обеспечение качества напряжения в электрических сетях Омского судостроительно-судоремонтного завода / Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, В. И. Клеутин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 334–336.
22. Результаты экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии в энергосистеме плавкрана СПГ-43/82 / М. Г. Вишнягов, А. М. Журовский, В. И. Клеутин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 404–408.
23. Обеспечение качества напряжения в береговой сети 0,4–10 кВ при подключении судов в период ремонта и разоружения / М. Г. Вишнягов, В. П. Горелов, Е. В. Иванова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 4. – С. 191–194.
24. Иванова, Е. В. Распределение кондуктивной электромагнитной помехи по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения в электроэнергетической системе / Е. В. Иванова // Транспортное дело России. – 2006. – № 11-1. – С. 45–47.
25. Сафонов, Д. Г. Использование вероятностно-статистических методов при обработке результатов измерений показателей качества электрической энергии / Д. Г. Сафонов, К. Х. Турахапов // Омский научный вестник. – 2010. – № 1 (87). – С. 140–144.
26. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – Москва : Наука, 1965. – 511 с.
27. Пугачёв, В. С. Теория вероятностей и математической статистики / В. С. Пугачёв. – Москва : Наука, 1979. – 478 с.