

УДК 621.3

Е.Ю. Анишев, Е.В. Рошин

**ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЕГУЛИРУЕМЫХ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ АЭС**

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Проанализированы аспекты влияния и способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных регулируемых асинхронных электроприводов собственных нужд атомных электростанций.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электроприводы, атомные электростанции, асинхронный вентильный каскад, преобразователи частоты.

В последние десятилетия мощный регулируемый электропривод находит все большее применение в системах регулирования расхода теплоносителей главных контуров АЭС. С ростом суммарной мощности электроприводов главных циркуляционных насосов (ГЦН), а она составляет в среднем 2–2,5% от выходной мощности блока, растут единичные мощности электроприводов ГЦН, которые достигают 5 МВт (для блока БН-800). Это выдвигает на первый план проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприводов в системе собственных нужд АЭС (СН АЭС).

Проблемы ЭМС включают в себя целый комплекс требований:

- влияние высших гармонических (ВГ) тока и напряжения на потери мощности и вращающий момент приводного электродвигателя;
- влияние ВГ на изоляцию статора и питающие кабели электродвигателя;
- воздействие коммутационных перенапряжений преобразователя частоты (ПЧ) относительно Земли, а также ВГ, создаваемых ПЧ, на изоляцию оборудования и кабельные линии энергосистемы собственных нужд.

Анализ проблем ЭМС для электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада (АВК), работающего почти 30 лет в качестве привода ГЦН 1-го и 2-го контуров блока БН-600 Белоярской АЭС, подробно рассмотрен в работе [1].

При расчетах искажений сети электроснабжения собственных нужд и энергетических показателей электроприводов ГЦН по схеме АВК ток статора асинхронного электродвигателя (АД) обычно принимают синусоидальным, а основным источником ВГ считается инвертор. Между тем, несинусоидальность тока статора АД необходимо учитывать при работе АВК на пониженных частотах вращения в автономной энергосистеме (при питании от аварийного дизель-генератора), содержащей конденсаторные установки.

На рис. 1 показан фазный ток статора двигателя i_A , рассчитанный для случая питания АВК мощностью 3500 кВт от автономного СГ мощностью 4000 кВА, а также опытные осциллограммы тока при питании от сети неограниченной мощности и автономного СГ. Анализ опытных и расчетных кривых показывает, что ток каждой фазы АД в общем случае носит непериодический характер, так как является суммой трех токов с частотами $(1-s)\omega$, ω , $(1+s)\omega$ (ω - круговая частота вращения, s - скольжение ротора АД).

Расчет показывает, что добавочные потери от высших гармоник в обмотках статора и ротора АД оказывают существенное влияние на общие потери АВК и нагрев машины. Наиболее заметна несинусоидальность токов и влияние гармонических на КПД привода при малых частотах вращения. Для двигателя ВАКЗ-16-64-6 (3500 кВт, 1000 об/мин) дополнительные потери от ВГ (без первой) на частоте вращения 750 об/мин составили для ротора 2,7 кВт, для статора 0,84 кВт, КПД в целом снижается на 0,6% (рис. 2).

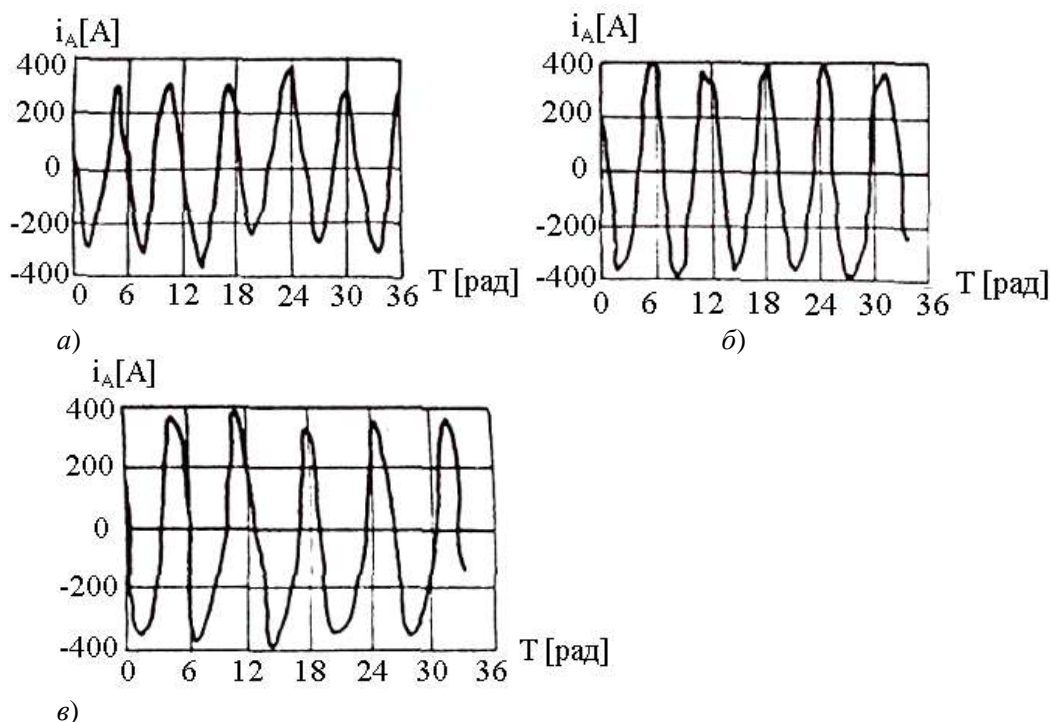


Рис. 1. Фазный ток статора двигателя АВК 3500 кВт при скольжении $s=0,25$:

a, б – питание от генератора (*a* – расчет, *б* – эксперимент);

в – питание от сети (эксперимент)

Экспериментальные исследования показывают, что влияние тока статора на гармонический состав сетевого тока незначительно, особенно в зоне подсинхронных частот вращения. Определяющими в спектре гармоник общего тока АВК являются гармоники тока инвертора.

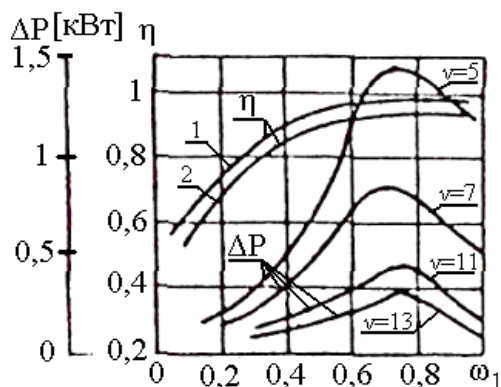


Рис. 2. Зависимости потерь (ΔP) для 5, 7, 11, 13 гармоник и кпд (η) двигателя от частоты вращения ротора:

1 – без учета, *2* – с учетом потерь от высших гармоник

Анализ распределения ВГ в сетях СН АЭС производился на основании построения эквивалентной схемы замещения блока АЭС и определения спектрального состава токов и напряжений в расчетных точках по известному спектру тока источника ВГ. В сети СН АЭС группы потребителей: источники питания - турбогенератор или дизель-генератор; источники ВГ - регулируемые электропривода ГЦН; потребители - асинхронные и синхронные электродвигатели, трансформаторы, нагреватели, сети освещения и т.д. Расчет гармонических сопротивлений блока производился в соответствии с [3]. По указанной методике произведен анализ распределения ВГ, коэффициентов несинусоидальности напряжений $K_{НС}$ и перегрузки $K_{П}$ отдельных потребителей для блока АЭС БН-600. Величина $K_{НС}$ для напряжений в

различных точках блока не превышает величины 5%, регламентированной ГОСТ 13109-97. Перегрузка потребителей незначительна и составила для высоковольтных двигателей максимальной мощности не более 0,3%, для турбогенератора - не более 0,15%. В основных режимах станции (при питании сети собственных нужд от турбогенератора) конденсаторные установки обычно отсутствуют и частотная характеристика схемы замещения практически линейна. В условиях промышленной сети, имеющей меньшую, чем на АЭС, мощность (например, на испытательном стенде) искажения сети и влияние ВГ на потребителя проявляется более резко. Кроме того, частотная характеристика схемы замещения из-за наличия конденсаторных установок имеет явно выраженные максимумы вследствие резонансов токов и напряжений на некоторых гармониках (рис. 3).

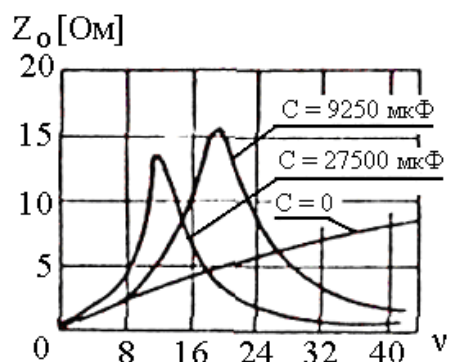


Рис. 3. Частотная характеристика схемы замещения с выключенными ($C=0$) и включенными конденсаторными батареями

Это может привести к перегрузке конденсаторных установок. Так, при совместной работе электроприводов ГЦН-1 и ГЦН-2 перегрузка составила $\sim 30\%$, что повлекло к необходимости введения специальных токоограничивающих реакторов.

Аналогичные явления могут наблюдаться при питании ГЦН в аварийном режиме, когда АВК питается от дизель-генератора и используются конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности. В общем случае энергосистема по отношению к АЭС, как к источнику ВГ, может играть роль фильтр-пробки ($X_{gv} = \infty$) или режекторного (отсасывающего) фильтра. Практические наблюдения показывают, что в основном ВГ замыкаются внутри сети СН АЭС, а гармоники, циркулирующие в энергосистеме, имеют высокий порядок ($\nu = 25 \div 35$) и величина их незначительна (рис. 4).

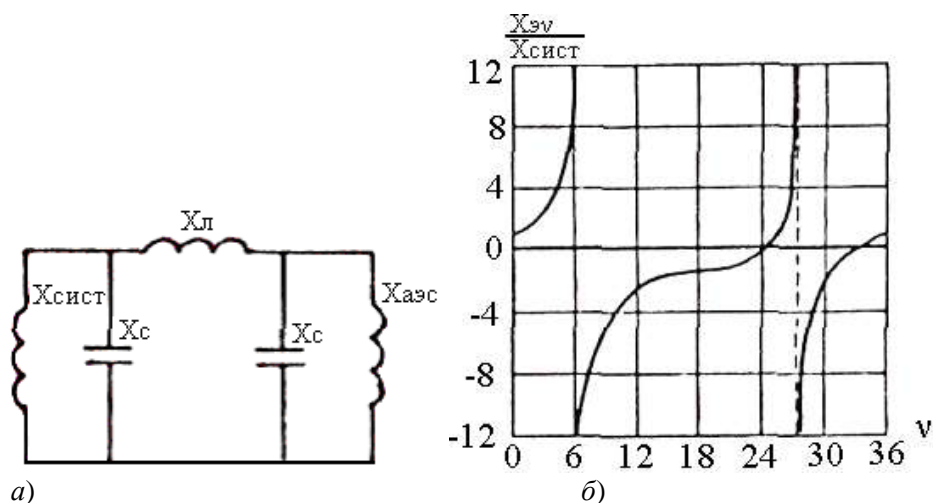


Рис. 4. Схема замещения (а) и частотная характеристика (б) энергосистемы

Таким образом, в системе электропривода АВК искажение гармонического состава токов АВК оказывает незначительное влияние на работу электродвигателя в части его нагрева от высших гармоник и снижения КПД, а также на работу энергосистемы собственных нужд и её потребителей.

Более серьезными проблемами для электропривода АВК оказались искажения тока, создаваемые вентиляльным преобразователем в цепи ротора и приведшие к низкочастотным пульсациям электромагнитного момента электродвигателя. Частота этих колебаний линейно связана со скольжением ротора асинхронных электродвигателей и снижается по мере приближения его к номинальному режиму работы. В связи с тем, что ГЦН – это механизмы высокоинерционные, имеющие низкие величины собственных частот крутильных колебаний, они могут быть подвержены опасным резонансным явлениям в валопроводах насосных агрегатов (рис. 5). Это явление в последние годы хорошо исследовано теоретически и практически и освещено в литературе [3, 4].

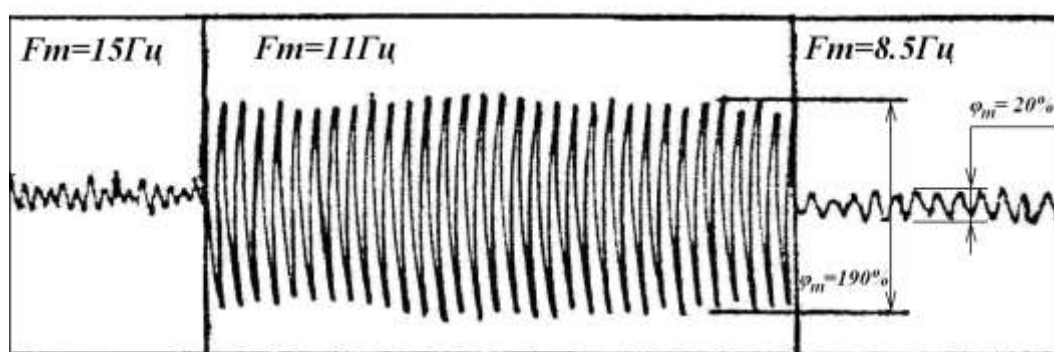


Рис. 5. Резонанс крутильных колебаний валопровода насоса в системе АВК 3500 на частоте вращения 965 об/мин

Для приводов всех типов важна форма токов и напряжений в двигателе, которая должна быть максимально близка к синусоидальной. В отличие от системы привода по схеме АВК привод с преобразователем частоты вследствие высоких частот коммутации токов в статоре резонанс крутильных колебаний валопроводов ГЦН маловероятен. В этом случае важны проблемы снижения электропотерь в активных частях электрической машины, а также сохранение качества изоляции токоведущих частей собственно двигателя и кабельных линий.

Очевидно, что влияние ПЧ в значительной мере определяется его топологией и алгоритмами управления автономного инвертора. Наиболее оптимально обеспечивается ЭМС преобразователей частоты с автономным инвертором тока (АИТ) на GTO или SGCT- тиристорах с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В таких инверторах, благодаря тому или иному алгоритму ШИМ обеспечивается минимизация искажений токов двигателя и на выходе АИТ формируется ток, основная гармоника которого практически может достигать 100%. Форма напряжения статора не содержит пиков коммутационных перенапряжений, близка к синусоидальной, а доля основной гармоники в напряжении статора также близка к 100%.

Например, преобразователь частоты PowerFlex 7000 фирмы Allen-Bradley обеспечивает близкую к синусоидальной форму кривых тока и напряжения двигателя, что исключает заметный дополнительный нагрев двигателя или нагрузку на его изоляцию. Температура двигателя при работе от частотно-регулируемого привода возрастает примерно на 3°C по сравнению с работой двигателя от сети. Значение du/dt в кривой напряжения не превышает 10 В/мкс. Амплитуда напряжения, приложенного к изоляции двигателя, соответствует величине действующего напряжения, деленной на 0,707. Проблемы отраженной волны и du/dt , часто связываемые с приводами на основе инвертора напряжения, не являются актуальными. Типичные формы тока и напряжения двигателя представлены на рис. 6. Такие благоприят-

ные для двигателя формы тока и напряжения получены благодаря использованию метода селективного подавления гармоник в инверторе для устранения высших гармоник главного порядка в сочетании с выходным конденсатором небольшой емкости (в составе привода) для устранения гармоник при работе на высоких скоростях.

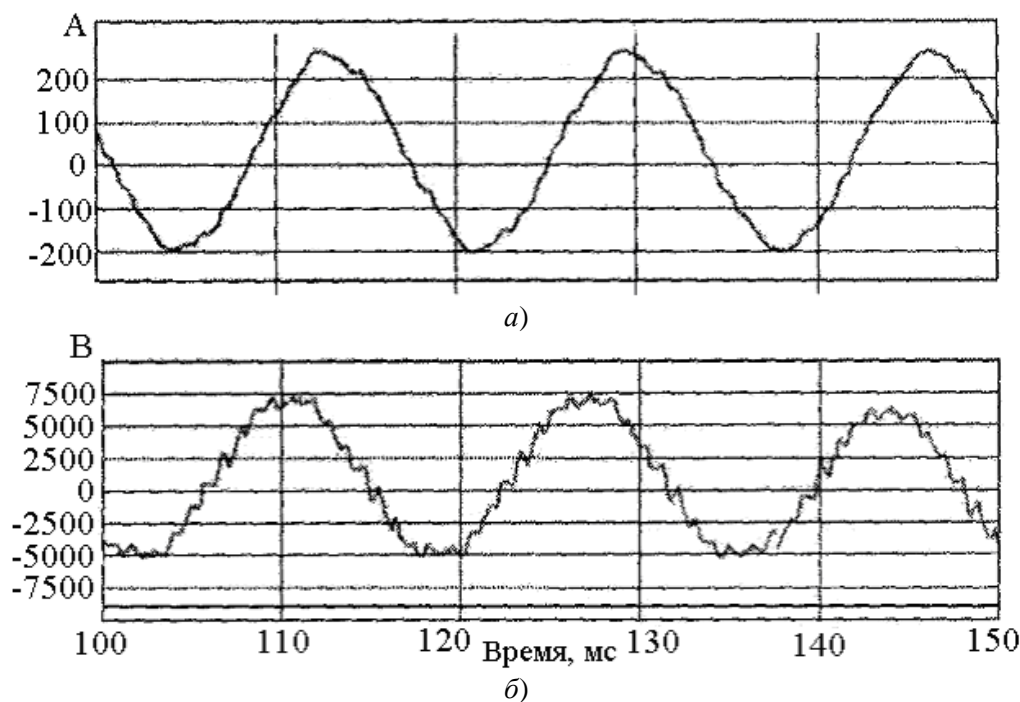


Рис. 6. Форма тока и напряжения двигателя при полной нагрузке и максимальной скорости:

а – форма тока; *б* – форма напряжения

По рекомендациям фирмы и, как показала практика, ПЧ на основе АИТ с ШИМ без ограничений можно сопрягать со стандартными асинхронными двигателями без снижения их номинальной мощности, и на длину соединительного кабеля между инвертором и двигателем не накладывается никаких ограничений (до 15 км).

Иначе обстоит дело при применении ПЧ на основе АИН с ШИМ. В этих преобразователях при высоковольтном исполнении применяются модули IGBT или последовательно соединенные IGCT. Такие преобразователи получили широкое распространение в мощных частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, но при их применении необходимо обеспечить снижение воздействий импульсов выходного напряжения АИН на изоляцию обмотки статора и локализацию волновых процессов в соединительном кабеле между инвертором и двигателем, сопровождающихся перенапряжениями (проблема "длинного кабеля").

В зависимости от длины кабеля возможно появление отраженной волны напряжения на выводах статора двигателя, достигающего в худшем случае практически двукратного значения, как результат несогласованности волнового сопротивления кабеля с входным сопротивлением двигателя, определяемым индуктивностью рассеяния статора и эквивалентной частотой фронта импульса. Возможность повреждения изоляции тем выше, чем меньше время нарастания импульсов выходного напряжения АИН, т.е. чем выше du/dt .

Для устранения негативных последствий, связанных с формой выходного напряжения, на практике в высоковольтных ПЧ применяют резонансные (LC) фильтры, подключаемые к выходу АИН.

Проблема электромагнитной совместимости вентиляльных преобразователей с примыкающими сетями электроснабжения связана, главным образом, с двумя факторами – потреб-

лением реактивной мощности на основной частоте и искажениями формы питающих преобразователи напряжений.

Оценку ЭМС можно проводить по расчету такого показателя качества электроэнергии, как коэффициент несинусоидальности $K_{нс}$. Величина $K_{нс}$ зависит от того, какой выпрямитель, 6- или 12-пульсный, содержит ПЧ.

Для того, чтобы ни в одном режиме $K_{нс}$ напряжения на шинах сети не превосходили норму по требованиям стандарта (<5%), отношение мощности короткого замыкания $S_{кз}$ на этих шинах и номинальной мощности преобразовательного трансформатора $S_{ном}$ (или номинальной полной мощности выпрямителя при бестрансформаторном подключении к сети) должно подчиняться неравенству

$$\frac{S_{кз}}{S_{ном}} \geq 20 \sqrt{\frac{1}{e_k^*} - 1}, \quad (1)$$

где e_k^* - напряжение КЗ преобразовательного трансформатора (или эквивалентное ему значение индуктивного сопротивления входного реактора), о.е.

Практическое осуществление этого способа означает необходимость замены существующего трансформатора собственными нужд более мощным. Очевидно, что такое решение в целом является экономически и технически нецелесообразным. Очевидно, что способ, основанный на улучшении топологии схемы преобразования, является более предпочтительным, чем рассмотренный ранее, но он требует применения специального разделительного трансформатора и усложнения преобразователя частоты (ПЧ).

Наиболее просто осуществляется двенадцатипульсная схема выпрямителя ($\mu=12$) путем параллельного или последовательного соединения шестипульсных выпрямителей, подключаемых к вторичным обмоткам трехобмоточного трансформатора, соединенным в «треугольник» и «звезду».

Одним из наиболее радикальных и перспективных способов решения задачи электромагнитного совмещения тиристорных электроприводов, уменьшения их влияния на сети электроснабжения и другие нагрузки (двигатели, трансформаторы) является разделение потребителей, при котором для регулируемых электроприводов формируется отдельная сеть электроснабжения.

Наличие в системе «сеть электроснабжения – преобразователь частоты – асинхронный двигатель» внутренних индуктивностей и емкостей оборудования относительно «земли», образующих колебательные контуры, приводит к тому, что электромагнитные процессы нормальной коммутации в преобразователе могут сопровождаться развитием перенапряжений относительно «земли».

Эти перенапряжения воздействуют на изоляцию оборудования преобразовательной схемы и нагрузки (приводного электродвигателя), ухудшая условия их эксплуатации. Кроме того, они вызывают увеличение токов утечек, замыкающихся по заземлениям, металлическим частям конструкции, броне кабелей и существенно повышающих уровни помех на системы управления и защиты преобразователя, и, в ряде случаев, могут приводить к ложному срабатыванию защит от замыкания на «землю».

Для демпфирования высокочастотной составляющей предложено, в частности, применять различные схемы включения RC-фильтров нулевой последовательности.

Наиболее рациональным способом увеличения индуктивного сопротивления в звене постоянного тока при сохранении приемлемых массогабаритных показателей ПЧ является включение последовательно со сглаживающими реакторами специального реактора с замкнутой магнитной системой. При этом магнитопровод такого реактора не должен насыщаться при протекании по его обмоткам рабочих токов ПЧ.

Указанным требованиям удовлетворяет реактор (РМ) с двумя встречно-параллельно включенными обмотками, расположенными на одном замкнутом магнитопроводе (рис. 7).

Каждая обмотка РМ включена в один полюс звена постоянного тока ПЧ. При этом магнитные потоки, обусловленные рабочим током i_p ПЧ взаимно уничтожаются, т.е. для рабочего тока РМ имеет малое сопротивление (сопротивление рассеяния).

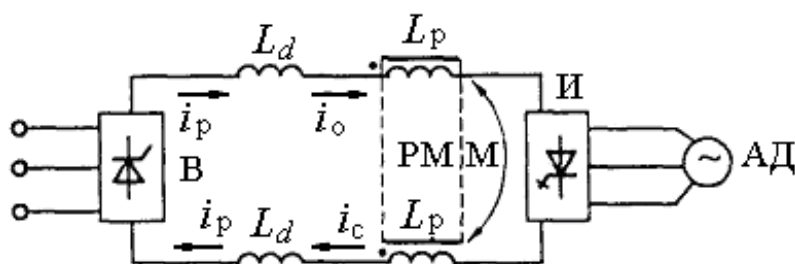


Рис. 7. Схема включения реактора с магнитопроводом в звено постоянного тока ПЧ

На рис. 8 приведена обобщенная зависимость амплитуды перенапряжений относительно "земли" при применении реактора с замкнутым магнитопроводом в звене постоянного тока ПЧ. Здесь максимальное напряжение относительно земли U_{max} отнесено к амплитуде фазного напряжения. Поэтому при известной эквивалентной емкости $C_э$ выбор индуктивности РМ следует проводить по соотношению

$$L_p = L_{p,э} = \frac{(5 \div 10) \cdot 10^{-6}}{C_э}, \text{ Гн.} \quad (2)$$

Область оптимальных значений произведения $L_{p,э}C_э$ выделена на рис. 8 штриховкой.

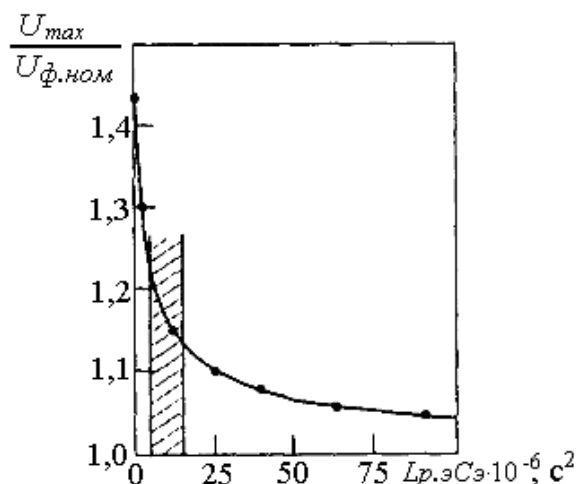


Рис. 8. Зависимость напряжения относительно «земли» на изоляции статора от параметров $L_{p,э}C_э$ схемы замещения

В целом, оценивая проблемы ЭМС различных типов электроприводов, следует сказать, что вариант с преобразователем частоты, построенном на элементной базе нового поколения, которая имеет на несколько порядков более высокую надежность, является более перспективным. Некоторые проблемы ЭМС ПЧ решаются более радикальным путем: повышение класса изоляции электрических машин и кабелей на выходе ПЧ до уровня реальных перенапряжений. За рубежом разработаны специальные кабели, рассчитанные на $U_{max} du/dt$ и предназначенные для использования в сетях с преобразователями частоты. Выбор способа решения проблем ЭМС с учетом всех вышеуказанных факторов должен базироваться на технико-экономическом расчете.

Библиографический список

1. **Анишев, Е.Ю.** Исследование гармонического состава токов электропривода по схеме асинхронно вентильного каскада / Е.Ю. Анишев, В.В. Юдин // Электропривод и автоматизация в машиностроении. ВЗМИ. Москва, 1986. С. 30–34.
2. **Жежеленко, И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1974.
3. **Анишев, Е.Ю.** Крутильные колебания вертикальных валопроводов в системе «мощный электропривод с регулируемой частотой вращения – центробежный циркуляционный насос» // Электротехника. 2009. №6.
4. **Анишев, Е.Ю.** Резонансные крутильные колебания в электромагнитных системах «асинхронный электропривод – насос» большой мощности // Приводная техника. 2009. №1.
5. **Лазарев, Г.Б.** Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника. 2004. № 10.
6. **Лазарев, Г.Б.** Обеспечение электромагнитной совместимости при применении частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в системах электроснабжения собственных нужд ТЭС // Вестник ВНИИЭ. 2000.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2010*

E.Y. Anishev, E.V. Roschin

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF VARIABLE ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN CIRCULATING PUMPS OF THE ATOMIC POWER STATION

The aspects of influence and ways of electromagnetic compatibility providing of power variable asynchronous electric drives in auxiliaries of the atomic power station have been analyzed.

Key words: electromagnetic compatibility, electric drives, atomic power station asynchronous salve cascade, frequency converter.