**Особенности конвертеров**

Виктор Марков

В этот раз мы рассмотрим процессы, протекающие в неоновой лампе и электрическом контуре, а также меры, направленные на стабилизацию работы световых установок с их применением.

Виктор Марков, канд. техн. наук, технолог неонового производства

В первой части статьи мы рассказывали о трудностях создания световых установок, которые напрямую связаны с принципом работы конвертера, однако существуют и некоторые косвенные проблемы, возникающие в самой световой линии при протекании в ней тока повышенной частоты. Они порождают ряд явлений, негативно сказывающихся на работе неоновых ламп. В этой части статьи мы опишем и проанализируем основные физические закономерности нелинейных процессов, протекающих в электрическом контуре, образованном неоновыми лампами, конвертером и соединительными проводами, а также сформулируем некоторые практические закономерности, которые помогут специалистам неонового производства правильно проектировать и монтировать световые установки.

**Монтажные емкости**

При частотах 18–40 кГц уже нельзя пренебрегать утечками рабочего тока, связанными с так называемыми монтажными емкостями, которые образуются элементами ламп, а также высоковольтными проводами с одной стороны и металлическими элементами с другой. Условно любую реальную световую линию можно представить в виде эквивалентной схемы (рис. 1).

Емкость С1 – эквивалентная емкость высоковольтных проводов. Она зависит от длины проводов и расстояния между ними и в принципе может быть рассчитана. На практике для уменьшения этой емкости рекомендуют разносить высоковольтные провода не менее чем на 20–25 мм и не допускать изгибов с радиусом менее 40 мм. Однако, как будет показано ниже, это может оказаться недостаточным в том случае, если кроме основной (несущей) частоты в световой линии появляются высокочастотные гармоники.

Емкости С2 – С6 образуются коаксиальной поверхностью электродов и элементами металлической конструкции. Максимальные значения емкостей характерны для параллельного расположения электродов относительно металлической поверхности (ситуация, характерная для металлических букв с контражурной подсветкой), минимальная – при перпендикулярном расположении электрода относительно металлической подложки или при отсутствии таковой. Следует отметить, что отсутствие близко расположенных металлических частей не может гарантировать полного отсутствия потерь, поскольку ток несущей частоты, протекающий в контуре, способен создавать вне контура переменное электромагнитное поле. В справедливости этого легко убедиться с помощью простейшего пробника с неоновым индикатором, который начинает светиться при приближении к различным элементам электрического контура (проводам, электродам и трубкам ламп). В индикаторе в этом случае электрическим полем контура возбуждается так называемый безэлектродный газовый разряд. Его яркость и протекающий ток зависят от напряженности переменного поля, которая определяется электрическим потенциалом в различных частях контура, частотой и состоянием внешней среды. Поэтому использование конвертеров с напряжением холостого хода выше 9 кВ сопровождается большими потерями, что приводит к перегрузке световой линии.

С7 – С10 – емкости межэлектродного промежутка. Максимальная емкость наблюдается при сближении электродов, ориентированных относительно трубки под 90°. Особенно это опасно в случае длинных ламп, поскольку ток утечки прямо пропорционален напряжению на обкладках конденсатора, которое, в свою очередь, пропорционально длине лампы.

Эквивалентная схема должна быть дополнена индуктивностями – выходной обмотки трансформатора преобразователя, а также столбов газового разряда неоновых ламп (на схеме не показаны). При определенных условиях электрический контур способен проявлять резонансные свойства, то есть самовозбуждаться на определенных частотах. Попробуем разобраться в этом достаточно сложном и до сих пор малоизученном вопросе.

Условия для самовозбуждения связаны с различными колебательными процессами в разрядной плазме, возникающими в нем под действием внутренних и внешних причин. Эти колебательные процессы принято разделять на две группы: реактивные колебания и страты.

**Реактивные колебания**

Реактивными называют колебания в электрической цепи, содержащей газоразрядные лампы, свойства которой зависят от балластного сопротивления (сопротивление вторичной обмотки выходного трансформатора конвертера), монтажных емкостей и сопротивления лампы. Динамическое сопротивление большой группы ламп (неоновых и ртутных с диаметром 8–12 мм) имеет отрицательную величину. Электрическая цепь, обладающая такими свойствами, склонна к самовозбуждению, то есть при определенном соотношении электрических параметров в ней возникают автоколебания в диапазоне nЧкГцч nЧМГц. Проявляются эти колебания в виде модуляции амплитуды основной (несущей) частоты. В случае электронных трансформаторов несущая частота (18–40 кГц) и частоты реактивных колебаний лежат практически в одном диапазоне. Поэтому нередки случаи, когда несущая частота провоцирует начало реактивных колебаний. В зависимости от величины их амплитуды и формы различают мягкий и жесткий режим возбуждения. Последний еще называют «релаксационным» или «прерывистым» режимом газового разряда.

Начало самовозбуждения в случае обычных электромагнитных трансформаторов связывают с перегрузом световой линии, поскольку в этом случае уменьшается значение балластного сопротивления. Явление перегруза возникает либо в результате неверных расчетов, либо по причине климатических особенностей (низкие температуры, осадки). Действие этих факторов достаточно просто устранить либо компенсировать.

С конвертерами дела обстоят значительно сложнее. Во-первых, более серьезную роль начинают играть монтажные емкости, которые проявляют себя даже в нормальных климатических условиях. Во-вторых, возникающие в электрическом контуре реактивные колебания за счет более высокой частоты увеличивают токи утечки на землю и в пространство. В этом легко убедиться, проведя опыт с неоновым индикатором.

Поскольку токи утечки в разных частях контура могут быть разными (что легко фиксируется индикатором), создаются условия, когда и токи, протекающие через отдельные лампы, окажутся различными, а следовательно, будет наблюдаться неодинаковая яркость свечения отдельных ламп. Так, к примеру, более тускло горят лампы, наиболее удаленные от трансформатора.

Не менее сложные проблемы колебания в разряде порождают в случае близкого расположения соседних световых контуров. За счет электромагнитного поля реактивные колебания одного контура могут спровоцировать аналогичные колебания в расположенном рядом контуре. При этом наиболее опасны динамические режимы работы контуров, что приводит к искажению анимационной картины.

Таким образом, в случае использования конвертеров пороги возбуждения реактивных колебаний могут меняться в самых широких пределах. При повышении нижнего порога возбуждения релаксационных колебаний вполне вероятно возникновение ситуации, когда эти колебания приводят к ложному срабатыванию системы защиты. Это наиболее опасно в случае применения трансформаторов с малыми рабочими токами (≤20 мА). Для снижения нижнего порога возникновения реактивных колебаний релаксационного типа можно рекомендовать использование лишь коротких световых линий, особенно при малых диаметрах и большом количестве поворотов газосветных трубок. К тому же результату приводит уменьшение давления рабочей среды ламп. Однако в этом случае может сократиться срок их службы.

**Явление катафореза**

Есть еще один эффект, связанный с действием реактивных колебаний, который приводит к искажениям свечения отдельных ламп. Имеется в виду часто наблюдаемое на практике явление катафореза (миграции ртути). Об этом явлении мы говорили в связи с рассмотрением особенностей построения конвертеров. Рассмотрим его более подробно. Катафорез наблюдается только при разряде в газовой смеси, когда за счет различной подвижности и диффузионных характеристик отдельных ионов и атомов возможно образование преимущественного движения примеси в сторону отрицательного электрода (катода).

В газосветных лампах такими примесями в инертных газах могут быть ртутные пары и так называемые молекулярные газы – продукты газовыделения со стенок стеклянных трубок и электродов (водяные пары, СО, СО2). Наиболее часто явление катафореза наблюдается в лампах с ртутным наполнением. Основным газовым компонентом здесь будет арго-неоновая смесь К-4, а примесью – ртутные пары. Из теории газового разряда известно, что газ с меньшим ионизационным потенциалом выделяется у катода. Поскольку в нашем примере пары ртути имеют существенно более низкий потенциал ионизации, то именно они и перемещаются в область катода, где в результате наблюдается наибольшая яркость.

В неоновых лампах (лампах, заполненных только неоном) катафорез – большая редкость и наблюдается, лишь когда лампа недостаточно хорошо изготовлена, в частности, если плохо обезгажены и активированы электроды. В этом случае парциальное давление молекулярных газов превышает допустимое для неоновых ламп значение в 10-3 Тор. Молекулы примесных газов подавляют процесс ионизации атомов неона и начинают излучать свечение, по своему спектру близкое свечению ртутных паров. При больших концентрациях примесей в лампе наблюдается «белесый» разряд. При небольших превышениях порогового значения давления примесей «белизна» смещается в сторону катода. Это и есть катафорез в неоновых лампах, который ошибочно объясняют «зартучиванием» вакуумной системы откачного поста.

Газосветные лампы работают на переменном токе, катод и анод в них меняются каждые полпериода, что, казалось бы, исключает появление катафореза. Однако это не так.

Во-первых, электроды могут иметь разную эмиссионную способность либо вследствие заводского брака, либо из-за плохой обработки на откачном посту. В этом случае амплитудные значения напряжений на лампе в разные полупериоды будут не равны по абсолютной величине, что эквивалентно появлению постоянной составляющей напряжения. Тогда молекулы и атомы примеси, к примеру ртутные пары, приобретут направленное движение в сторону того электрода, который больше катод. Эта ситуация характерна прежде всего при использовании электромагнитных трансформаторов.

Во-вторых, сам трансформатор может обладать постоянной составляющей напряжения, что характерно только для конвертеров. При этом катафорез провоцируется самим трансформатором. Кстати, чтобы убедиться в отсутствии постоянной составляющей, достаточно запитать им контрольную ртутную лампу и проследить за поведением этой лампы в течение некоторого времени. Чем больше время такого тестирования, тем меньшее значение постоянной составляющей можно выявить. В-третьих, как отмечал в своей статье Маркуса Тилена1, в обычных трансформаторах ион ртути за время полупериода может пройти путь в 1,125 м, что сопоставимо со средней длиной ламп. Поэтому слабая несимметричность ламп мало влияет на протекание катафореза. Для электронных трансформаторов этот путь составит 1,5 мм, что значительно меньше длины ламп. В этом случае даже малая несимметричность тока (постоянная составляющая) приводит к накоплению этих элементарных движений, и катафорез достаточно быстро начинает проявляться. Прошу обратить внимание, что чем больше частота работы конвертера, тем быстрее может проявиться катафорез. В-четвертых, отсутствие постоянной составляющей на выходе конвертера еще не гарантирует отсутствия миграции ртути при наличии развитых реактивных колебаний, появление которых приводит к понижению потенциала плазмы, особенно вблизи катода. Механизм данного явления достаточно сложен, поэтому ограничимся простой констатацией, что условия эмиссии электронов в присутствии реактивных колебаний могут меняться. Но ранее мы выяснили, что из-за неравномерности токов утечки по монтажным емкостям и неравномерности излучения электромагнитных волн различными частями контура снижение эмиссии электродов в присутствии реактивных колебаний тоже будет неравномерным. Таков механизм «наведенной» несимметричности ламп, вследствие которого миграция ртути может наблюдаться в отдельных лампах контура даже при абсолютно симметричном выходном напряжении на выходе конвертера. Как видим, важнейшим условием отсутствия этого явления становится максимальная симметричность электрического контура в целом.

**Стратовые колебания**

Известно, что плазма тлеющего разряда неравновесная. Однородное состояние положительного столба такого разряда часто оказывается неустойчивым, случайные возмущения, постоянно возникающие в этом разряде, могут катастрофически нарастать, и плазма при этом переходит в иное, пространственно неоднородное состояние. Такое неоднородное состояние часто наблюдается визуально в виде плазменных полос, чередующихся с затемнениями. Это так называемый стратифицированный разряд.

Механизмы неустойчивостей, вызывающие возникновение страт, определяются преимущественно ионизационными процессами и зависят от длины трубки, ее формы (наличие поворотов, обратных ходов, сужений и т.д.), а также параметров газовой среды (давление и род газа). К примеру, хорошо известно, что страты редко наблюдаются в смесях. Поэтому в ртутном разряде страты возбуждаются только в особых условиях. Однако, принимая во внимание внутренние причины, нельзя не учитывать влияния параметров внешнего контура. Провоцировать стратовые колебания могут электромагнитные наводки от соседних контуров и даже от близко расположенных ламп того же контура. Физика таких колебаний не менее сложна, чем физика реактивных колебаний. Поэтому в нашем анализе мы постараемся выделить только те закономерности, которые необходимо учитывать в повседневной работе.

Стратовые колебания имеют обычно две границы возбуждения – при низких и высоких токах. Между этими пороговыми значениями страты отсутствуют. Границы возбуждения страт зависят от перечисленных параметров. Так, при увеличении длины ламп область отсутствия страт уменьшается. Повышение диаметра трубки, наоборот, приводит к ее увеличению. Зависимость от давления более сложна и связана с наличием примесей. Для нас наиболее важной является нижняя граница возникновения страт. Поэтому нельзя допускать перегруза трансформаторов. В случае применения конвертеров задача еще больше осложняется. Как известно, при определенных условиях в электрическом контуре возникают локальные области, где токи, протекающие через лампы, меньше нижнего порога возбуждения страт. Если в этих частях контура расположены лампы, склонные к образованию страт (длинные, изогнутые, малого диаметра), то страты возникнут обязательно. Кстати, простым увеличением напряжения холостого хода трансформатора такие колебания далеко не всегда удается исключить, поскольку с повышением напряжения может расти и неоднородность контура. И опять мы вынуждены констатировать, что условием отсутствия стратовых колебаний следует считать симметричность всего электрического контура, которая достигается тщательным подбором ламп по длине, диаметру и конфигурации.

Кроме световых искажений, страты способны провоцировать и другие негативные явления. К примеру, стратифицированный разряд характеризуется возрастанием катодного падения потенциала, что часто приводит к преждевременному распылению активного слоя электродов. Кроме того, в областях пучности стратовых колебаний наблюдается повышенный градиент радиальной составляющей электрического поля, что способствует локальной деградации люминофорного слоя. В результате наблюдается неравномерная яркость свечения трубки. Поскольку стратовые волны возникают преимущественно в неоновых лампах, в которых отсутствует ртуть, то для борьбы с этим явлением могут быть использованы конвертеры с постоянной составляющей напряжения. При этом максимально возрастает безстратовая область. Подобные трансформаторы предлагаются рядом фирм, однако используются крайне редко, так как лишь немногие специалисты знакомы с физическими закономерностями возникновения стратовых волн.

**Меры стабилизации**

Теперь, когда описаны основные процессы, которые протекают в электрическом контуре, достаточно легко понять смысл многочисленных инструкций фирм, изготавливающих электронные трансформаторы. В основном они касаются особенностей эксплуатации той или иной модели конвертера, а также технологии проведения монтажных работ. Реже встречаются рекомендации, относящиеся к конструкции световых элементов и прогнозированию безотказной работы световой установки. Большинство советов носят универсальный характер и направлены на снижение влияния эффектов, описанных выше. К этой группе рекомендаций относятся меры по снижению паразитных монтажных емкостей, поскольку в этом случае нижний порог реактивных и стратовых колебаний смещается в сторону меньших токов, и значения токов в световых элементах выравниваются. Утечки, связанные с емкостями и внешним излучением, минимизируются, что приводит к симметричности световых элементов и, следовательно, отсутствию миграции ртути. Для решения этих задач подвергают регламентации расстояния между высоковольтными проводами, между лампами, а также расстояния частей светового контура относительно токопроводящих элементов металлоконструкции. Эти рекомендации носят эмпирический характер и сильно отличаются друг от друга. Но в среднем рекомендуемые расстояния лежат в диапазоне 2–2,5 см. Наиболее интересные оценки этих конструктивных параметров, предложенные специалистами неонового завода «Ярко», включают зависимость от напряжения холостого хода трансформатора, к примеру, следующим образом: L = 9 + 4,5 Ч U, где L – геометрический параметр, измеряемый в мм, U – напряжение холостого хода, измеряемое в кВ. Нетрудно заметить, что при высоких значениях напряжения холостого хода оценка L будет существенно отличаться от 2–2,5 см.

Блок требований, связанных с конструктивными параметрами самих ламп, в большинстве инструкций либо отсутствует вообще, либо присутствует фрагментарно. Так, не рекомендуется использовать длинные и сильно изогнутые лампы (прописной шрифт). Мы знаем теперь, что ртутные лампы такой конфигурации склонны к катафорезу, особенно если они расположены в середине световой линии, а в неоновых лампах возникает опасность стратовых колебаний из-за сближения верхней и нижней границ порогов этих колебаний. Следует отметить, что именно такие газосветные лампы сложной конфигурации чаще всего применяются в интерьерных и витринных вывесках совместно с конвертерами.

Зависимость от диаметра в инструкциях присутствует лишь в неявной форме (таблицы расчета световых линий). Для повышения однородности свечения контура следует, на мой взгляд, избегать использования в одной световой линии ламп разного диаметра и заполненных разными газами, а также большого разброса ламп по длине. Желательно также ограничить применение ламп с близким расположением электродов. Существуют рекомендации частного характера. К ним относятся: интерьерное либо уличное исполнение трансформаторов; рекомендация об увеличении давления газа (особенно в длинных трубках) для снижения порогов начала реактивных и стратовых колебаний; заземление элементов конструкции (мера электробезопасности); ограничение на близкое расположение соседних электрических контуров.

В данной статье предлагались и другие инструкции, которые носят не регламентирующий, а скорее технологический характер. Поскольку до изготовления установки невозможно предусмотреть все возможные трудности, то следует рекомендовать проведение следующих технологических мероприятий: предварительный отбор конвертеров на наличие постоянной составляющей (длительная тренировка с использованием ртутной контрольной лампы); симметрирование светового контура в производственных условиях, например, с применением неонового пробника либо других более сложных приборов (подбор трансформаторов, прокладка провода и т.д.); длительное испытание светового контура в производственных условиях на предмет возникновения различных световых дефектов. Отдельно следует остановиться на проблеме расчета световых линий для электронных трансформаторов. Практика лабораторных исследований показывает, что уже при нагрузке, составляющей 60–70% от рекомендуемой, во многих электронных трансформаторах наблюдаются реактивные колебания. При больших нагрузках начинает проявляться неравномерность излучения электрического контура, а также возникают искажения световых характеристик. У ламп, наиболее удаленных от конвертера, снижается яркость свечения, а некоторые лампы проявляют начальные симптомы катафореза. В уличных условиях эти показатели ненормальной работы могут наблюдаться при тех же и даже меньших нагрузках. Отсюда следует практический вывод о том, что нельзя рекомендовать использовать конвертеры для работы на длинные линии, особенно на улице.

**Апология конвертеров**

Указанные в статье рекомендации и комплекс технологических мер позволяют надеяться на обеспечение нормальной работы газосветных ламп с электронными трансформаторами как в интерьерных, так и в уличных установках.

Трудности, возникающие при работе в подобных установках, – не признак ущербности самих трансформаторов, а скорее мера нашего непонимания тех сложных процессов, которые протекают в газосветных лампах и во всем электрическом контуре.

Поскольку эти процессы в разрядной плазме носят ярко выраженный нелинейный характер, то предсказать, при каких условиях будут наблюдаться те или иные явления (реактивные колебания, страты, миграция ртути), практически невозможно. Поэтому табличные расчеты следует заменять практическими рекомендациями и предварительными испытаниями (в производственных условиях) светового контура.

**Список литературы**

Вывески № 7 (85), ИЮЛЬ, 2007 г.