

живают большие напряжённости поля. В полях  $\approx 400$  кЭ определяемое магн. полем давление  $\sim H^2/8\mu$  создаёт в элементах конструкции соленоидов механич. напряжения, превосходящие предел текучести  $\sigma_s$  большинства традиционно используемых для их изготовления материалов (Cu, разл. бронзы, Al и др.). Пондеромоторные силы стремятся разорвать витки обмотки соленоида в радиальном направлении и сжимают их в осевом, разрушая изоляцию. Уменьшением длительности импульса поля можно добиться того, чтобы материал обмотки не претерпел за время импульса знач. деформации. Квазистационарные соленоиды — многovitковые системы, обладающие, как правило, большим отношением собственной индуктивности к сопротивлению, и их легко согласовать с любыми используемыми источниками тока: конденсаторными батареями, мотор-генераторами, униполярными генераторами.

Существует большое кол-во конструкций квазистационарных соленоидов: однослойные и многослойные, секционированные, спиральные, часто используется конструкция биттеровского типа. Для повышения прочности конструкций применяют пропитку обмоток компаундами и используют наружные бандажки из прочной стали и композитных материалов. Рабочие объёмы поля соленоидов колеблются от неск. см<sup>3</sup> до неск. сотен см<sup>3</sup>, длительность импульсов у криогенных соленоидов, как правило, на 1 ÷ 2 порядка выше, чем в твёрдых. Ресурс соленоидов определяется не только механич. прочностью и тепловой стойкостью материала обмоток, но и качеством межвитковой электрич. изоляции. Из-за накопления неизбежных остаточных деформаций в материале обмоток и изоляции в процессе работы соленоидов их ресурс ограничен и составляет от неск. импульсов при макс. полях до неск. тысяч импульсов.

В ряде конструкций предложены способы, облегчающие решение проблем механич. прочности соленоидов. В конструкции с самоподдерживающимися обмотками соленоид разбивается на секции, в каждой из к-рых механич. напряжения не превышают предела прочности материала и не передаются от одной секции к другой. Суммарное воспроизводимое поле в таком соленоиде может быть  $\sim 1$  МЭ. Однако при такой конструкции резко увеличиваются размеры и вес системы и снижается эффективность использования источника энергии (доли %). Для «бессильных» конфигураций обмоток векторы плотности тока  $j$  и поля  $H$  параллельны. В этом случае пондеромоторные силы  $F \sim [jH]$ , приводящие к механич. напряжениям в витках, обращаются в нуль (для бесконечных систем). Для реальных (конечных) обмоток можно добиться существ. уменьшения действующих сил в одной части магнита, а другая его часть будет «удерживать» (обжимать) первую. Такие «бессильные» конфигурации преобразуют высокое давление в малой области в низкое давление, распространённое на большую область, что приводит к увеличению размеров всей системы. Простейшая «бессильная» конфигурация представляет собой обмотку, навитую на цилиндрич. каркас под углом  $45^\circ$  к образующей цилиндра. В такой системе наруж. азимутальное поле равно внутреннему аксиальному.

Сверхсильные импульсные магнитные поля получают чаще всего при разряде ёмкостных накопителей энергии на одновитковые соленоиды (рис. 3). Одновитковые катушки, разрушающиеся при однократном использовании, являются наиб. простой конструкцией для получения импульсных магн. полей в диапазоне 1 ÷ 4 МЭ. Внутр. диаметр и длина катушек обычно не превышают 1 см. Индуктивность их мала ( $L \sim \mu H$ ), поэтому для генерации в них сверхсильных полей требуются токи мегаамперного уровня. Их получают с помощью высоковольтных конденсаторных батарей с низкой собств. индуктивностью и запасаемой энергией

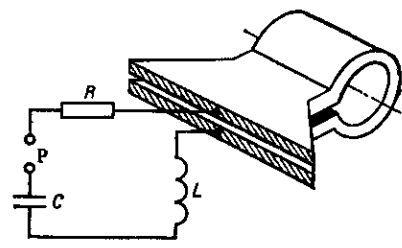


Рис. 3. Одновитковый соленоид, включённый в цепь конденсаторной батареи: С — конденсаторная батарея; Р — разрядник; R — сопротивление контура; L — внутренняя индуктивность контура.

$W \sim 10^4 \div 10^8$  Дж. Длительность импульсов получаемого поля  $\tau \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$  с, а время нарастания поля до макс. значения составляет обычно  $0,5 \div 2$  мкс. Существ. роль в процессе генерации таких полей играет скин-эффект: ток концентрируется в тонком слое  $\delta$  на внутр. поверхности соленоида. Плотность тока достигает очень больших величин  $j \geq 3 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>. Следствием этого является возникновение в материале соленоида знач. градиентов темп-ры и магн. давления. Большие величины магн. давления  $H^2/8\mu$ , преобразующиеся в пределах глубины скин-слоя  $\delta$  в механич. напряжения, инициируют ударно-волновое сжатие и пластич. течение материала соленоида за фронтом ударной волны. Из-за мощного энерговыделения  $j^2 \rho$  в скин-слое растёт уд. сопротивление  $\rho$ , проникновение поля в материал соленоида приобретает нелинейный характер, токовый слой с внутр. поверхности перемещается в глубь проводника. Процесс нагрева носит адиабатич. характер. Темп-ру поверхности в этом случае можно оценить по ф-ле  $T = H^2/8c_v \gamma \approx 3000 H^2$ , где  $c_v$  — уд. теплоёмкость при пост. объёме,  $\gamma$  — плотность материала катушки (величина  $H$  выражена в МЭ). Уже при  $H = 1$  МЭ поверхностный слой катушки, выполненный из тугоплавких металлов, начинает плавиться. С дальнейшим ростом поля область плавления распространяется в глубь проводника, а на его поверхности начинается испарение материала. «Волна испарения» проникает внутрь проводника, вследствие чего он теряет проводимость. Одновременно создаются условия для развития неустойчивостей на границе поле — проводник и электрич. пробоя слоя металлич. паров, образующихся вблизи поверхности соленоида (характерные времена этих процессов сравнимы с длительностью импульса поля  $\tau$ , а их интенсивность резко нарастает с увеличением  $H$ ). В итоге происходит взрывообразное разрушение материала соленоида («взрыв скин-слоя»). За время  $\tau$  возрастает размер области, занимаемой полем в соленоиде, увеличиваются индуктивность и сопротивление соленоида. Это приводит к нарушению линейной зависимости между  $H$  и  $I$  (рис. 4) и простран-

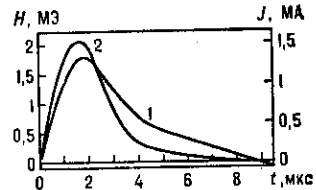


Рис. 4. Временные зависимости тока и поля при разряде конденсаторной батареи на одновитковый соленоид (медь, диаметр  $d_0 = 2,4$  мм, длина  $l_0 = 4$  мм): 1 — ток, 2 — поле.

венной нестационарности поля. При генерации мегаэртных импульсных полей ( $H \sim 1 \div 4$  МЭ) осн. роль играет физ. процессы взаимодействия поля с материалом соленоида. Количеств. характеристики физ. процессов зависят не только от величин поля  $H$ , скорости его изменения  $dH/dt$ ,  $\tau$ , но и от физ. свойств материала соленоида и его размеров. По совокупности свойств лучше др. металлов противостоят разрушаю-