

Совершенствование методов и технических средств индикации наличия рабочего напряжения в отключенных секциях контактной сети

П.А. Бодров, Ю.Г. Семенов

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

Аннотация: Предложен способ для бесконтактной индикации наличия рабочего напряжения в отключенных секциях контактной сети переменного тока, основанный на свойствах жидких кристаллов и эффекте электрических влияний. Приведен порядок для выбора параметров индикатора напряжения при использовании на однопутных участках тяговой сети. Показана возможность использования знаково-синтезирующих жидкокристаллических индикаторов для создания бесконтактных индикаторов без внутреннего источника питания для индикации наличия рабочего напряжения на участках контактной сети.

Ключевые слова: контактная сеть переменного тока, однопутный участок, отключенная секция, рабочее напряжение, бесконтактная индикация, жидкокристаллический индикатор, свойства, схема замещения, выбор параметров.

С целью обеспечения электробезопасности ремонтного персонала до производства ремонтных работ на отдельных секциях железнодорожной контактной сети после снятия с секции рабочего напряжения перед ее заземлением и допуском персонала к работе в обязательном порядке требуется проверка наличия или отсутствия рабочего напряжения в отключенной секции [1]. В настоящее время такая проверка осуществляется с помощью заземляющей штанги. Штанга сначала присоединяется нижней частью к рельсу, а верхняя часть временно дополнительно оборудуется отрезком тонкой медной проволоки, называемой в обиходе «усиком». Поднимают заземленную штангу, и касаются концом усика стальной части фиксатора, которая присоединена к контактному проводу. Если в месте касания появляется или отсутствует искрение, то это означает отсутствие рабочего напряжения в секции. Если в отключенной секции присутствует

рабочее напряжение, то такое касание вызывает короткое замыкание в тяговой сети и перегорание «усика» с возникновением кратковременной электрической дуги. Такую трудоемкую процедуру определения наличия или отсутствия рабочего напряжения нельзя считать полностью безопасной по следующим причинам. Во-первых, случайное прикосновение «усика» непосредственно к контактному проводу часто приводит к его пережогу и обрыву, т.е. к непреднамеренному повреждению. Во-вторых, перегорание «усика» сопровождается световой вспышкой и образованием падающих расплавленных частиц меди с возможным попаданием на оператора. В-третьих, при плохом контакте штанги с рельсом или его отсутствии работник, производящий такие действия, может получить электротравму, даже работая в диэлектрических перчатках. В-четвертых, зачастую описанные действия приходится неоднократно повторять в ситуациях, когда рабочее напряжение присутствует в уже отключенной секции из-за недоотключения линейных разъединителей, управляемых диспетчером дистанционно, по причине заедания привода, производя повторные включения и отключения, что является более трудоемким и длительным процессом, увеличивающим вероятность проявления негативных последствий. Изложенный выше метод является контактным. Для совершенствования метода следует использовать бесконтактные методы и технические средства с индикацией напряжения с железнодорожного полотна.

Основой создания бесконтактных приборов являются влияния электрического переменного поля источника на металлические провода [2 – 4], которая находится в зоне действия поля. Приборы представляют собой сигнализаторы или индикаторы напряжения для линий выше 1 кВ. Однако, устройства имеют достаточно громоздкую конструкцию, имеют внутренний источник питания, содержат электронные схемы усиления, управления,

подстройки и т.д. Источник питания требует постоянного контроля уровня заряда или своевременной замены элементов питания, что, по мнению служб эксплуатации, усложняет использование приборов и снижает их надежность. Конструкции бесконтактных индикаторов без источника питания применяются только для индикации напряжений до 1000 В [5]. Конструкции бесконтактных индикаторов без источника питания для определения наличия рабочего напряжения в контактной сети переменного тока на сегодняшний день не применяются.

Создание бесконтактных индикаторов без источника питания для определения наличия рабочего напряжения в отключенных секциях контактной сети напряжением 27,5 кВ требует иметь элементы, высокочувствительные к переменному электрическому полю и с микропотреблением. К таким элементам можно отнести знаково-синтезирующие индикаторы (ЖКИ), выполненные на основе жидких кристаллов и обладающие уникальными свойствами, удовлетворяющими поставленной задаче. ЖКИ обладают следующими характеристиками [6,7]. Индикаторы управляются переменным напряжением. Напряжение срабатывания (смена контраста знаковых сегментов индикаторов различных конструкций) составляет доли и единицы вольт. При этом наблюдается одноступенчатый резкий переход от пропускания к непропусканию света (вольт-контрастная характеристика). Порог напряжения смены контраста $U_{\text{пор}}$ является величиной устойчивой и практически неизменной. Слой жидких кристаллов, расположенный между отдельными сегментами ЖКИ и подложкой, относится к диэлектрикам с удельным сопротивлением $10^8 \dots 10^{10}$ Ом·см [7], что обеспечивает микропотребление ЖКИ. Кроме того, ЖКИ по своему основному назначению является информационным элементом, выполняемым в виде нескольких цифровых десятичных разрядов, каждый из которых содержит по семь отдельных сигнальных сегментов.



Рис. 1. – Структура ЖКИ и внутренние емкостные и резистивные связи

На рис.1 показана структура ЖКИ с использованием двух разрядов (БС), формирующих из отдельных параллельно соединенных знаковых сегментов цифру «25» (номинальное напряжение в контактной сети 25 кВ).

Пунктиром обозначены внутренняя суммарная емкость $C_{и}$ и суммарное активное сопротивление $R_{и}$ между объединенными 10-ю сегментами и подложкой. На сигнальные элементы для их проявления должно быть подано переменное напряжение управления $U_{у}$, $U_{у} \geq U_{пор}$, где $U_{пор}$ – пороговое значение проявления сегментов для данного типа индикатора ЖКИ.

Рассмотрим простейший случай возможности индикации наличия рабочего напряжения в секции контактной подвески однопутного участка тяговой сети без дополнительных проводов с помощью бесконтактного индикатора напряжения (БИН) на основе ЖКИ типа ИЖКЦ1–4/8. Предполагается проведение индикации в середине пролета между опорами контактной сети. Для этого типа индикатора параметры $C_{и} = 188$ пФ и $R_{и} = 23,5$ МОм для 10 параллельно соединенных сегментов с использованием [8].

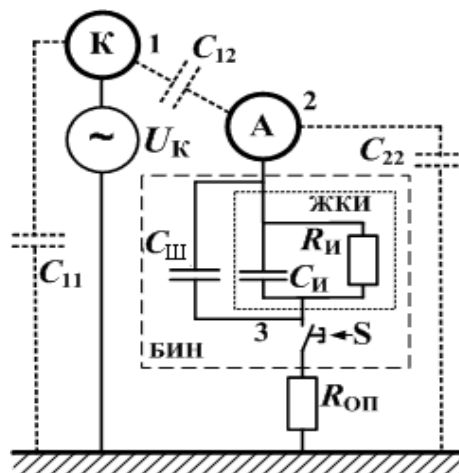


Рис. 2. – Схема замещения БИН с внутренними и внешними связями

На рис.2 приняты обозначения: К – эквивалент контактной подвески; U_K – напряжение в контактной подвеске; C_{12} – взаимная емкость контактной подвески К (точка 1) и антенны индикатора А (точка 2); C_{11} – собственная емкость эквивалента контактной подвески на землю; C_{22} – собственная емкость антенны на землю; S – сенсорный контакт; $R_{оп}$ – сопротивление оператора ($R_{оп} \approx 1$ кОм); $C_{ш}$ – емкость шунтирующего конденсатора (изделие). Конденсатор емкостью $C_{ш}$ (изделие) необходим для подбора напряжения управления U_y , поступающего на ЖКИ.

В режиме разомкнутого сенсорного контакта S электрическая связь подложки индикатора с землей через оператора и напряжение на элементах ЖКИ отсутствуют. Сегменты остаются невозбужденными. В режиме индикации при замыкании контакта S на подложку ЖКИ (точка 3) поступает нулевой потенциал земли через сопротивление оператора $R_{оп}$ (из-за малости в дальнейшем не учитывается). По цепи между точками 1 и 3 начинает протекать ток, создающий падение напряжения между точкой 2 и точкой 3, которое является напряжением управления U_y . Поэтому задача сводится к определению такого значения шунтирующей емкости $C_{ш}$, при которой обеспечивается условие $U_y \geq U_{пор}$. При этом в режиме индикации между

точками 2 и 3 емкости $C_{И}$, C_{22} , $C_{Ш}$ соединяются параллельно сопротивлению $R_{И}$. Суммарная емкость цепи между точками 2 и 3 (рис. 2) в режиме индикации определится по (1):

$$C_{O} = C_{И} + C_{22} + C_{Ш} \text{ или } C_{Ш} = C_{O} - C_{И} - C_{22}, \quad (1)$$

Комплексное сопротивление участка цепи между точками 2 и 3:

$$\underline{Z}_{2-3} = \frac{-jX_{CO}R_{И}}{R_{И} - jX_{CO}}, \quad (2)$$

где $X_{CO} = 1/(\omega C_{O})$; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота питающей сети.

Полное комплексное сопротивление цепи между точками 1 и 3 (без учета относительно малого сопротивления $R_{ОП}$) равно:

$$\underline{Z}_{1-3} = \underline{Z}_{1-2} + \underline{Z}_{2-3} = -jX_{C12} + \frac{R_{И} \cdot (-jX_{CO})}{R_{И} - jX_{CO}}, \quad (3)$$

где $X_{C12} = 1/(\omega C_{12})$.

Комплекс действующего значения тока в цепи между точками 1 и 3 с учетом (2) и (3):

$$\underline{i} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{1-3}} = \frac{\underline{U}(R_{И} - jX_{CO})}{X_{C12}X_{CO} - jR_{И}(X_{CO} + X_{C12})}, \quad (4)$$

где \underline{U} – комплекс действующего значения напряжения в контактной сети.

Падение напряжения на участке цепи 2 – 3 будет равно произведению выражения (4) на выражение (2):

$$\underline{U}_{2-3} = \underline{i}\underline{Z}_{2-3} = \frac{\underline{U}(-jX_{CO}R_{И})}{X_{C12}X_{CO} - jR_{И}(X_{CO} + X_{C12})}. \quad (5)$$

Модуль числителя выражения (4):

$$|A_{ч}| = U(X_{CO}R_{И}). \quad (6)$$

Модуль знаменателя выражения (4):

$$|B| = \sqrt{X_{C12}^2 X_{CO}^2 + R_{И}^2 (X_{CO} + X_{C12})^2}. \quad (7)$$

Значение модуля падения напряжения на участке цепи на участке 2–3 приложено к ЖКИ и является напряжением управления U_y и может быть найдено путем деления выражения (5) на выражение (6):

$$|\dot{U}_{2-3}| = |\dot{U}_y| = \frac{\dot{U}(X_{CO}R_{II})}{\sqrt{X_{C12}^2 X_{CO}^2 + R_{II}^2 (X_{CO} + X_{C12})^2}}. \quad (8)$$

Для получения конкретных численных значений по выражению (8) требуется расчет взаимной емкости C_{12} между эквивалентом контактной подвески К и антенной индикатора А, а также величин, входящих в суммарную емкость по выражению (1). Составим систему уравнений с использованием первой группы формул Максвелла [8] для системы из двух проводов (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \tau_1 \alpha_{11} + \tau_2 \alpha_{12} \\ \varphi_2 &= \tau_1 \alpha_{21} + \tau_2 \alpha_{22} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где φ_1, φ_2 – потенциалы поверхности соответственно эквивалента контактной подвески К и антенны А; τ_1, τ_2 – линейные плотности зарядов соответственно на эквиваленте контактной подвески 1 и антенне 2. Потенциальные коэффициенты в выражении (9):

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2\pi\epsilon} l_{\text{Э}} \cdot \ln\left(\frac{2b_1}{\rho_K}\right); \alpha_{22} = \frac{1}{2\pi\epsilon} l_{\text{Э}} \cdot \ln\left(\frac{2h}{\rho_2}\right); \alpha_{12} = \frac{1}{2\pi\epsilon} l_{\text{Э}} \ln\left(\frac{D_{12}}{d_{12}}\right). \quad (10)$$

В (10) ρ_K, ρ_2 – радиусы эквивалента контактной подвески и антенны; $l_{\text{Э}}$ – длина сближения антенны с контактной подвеской. Геометрические размеры взаимного расположения эквивалента контактной подвески К и антенны А, входящие в (10), показаны на рис. 3.

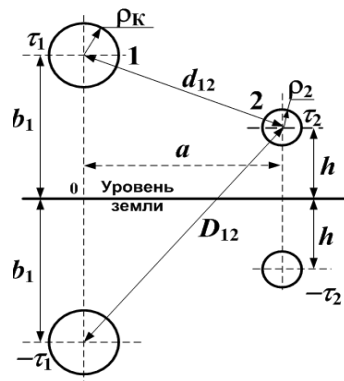


Рис. 3. – Геометрия расположения эквивалента контактной подвески К (точка 1) и антенны А (точка 2)

Эквивалентный радиус контактной подвески ρ_K можно найти из выражения (11) [9-10]:

$$\rho_K = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}, \quad (11)$$

где n – количество проводов; r_0 – радиус одного провода; r_p – радиус окружности, по которой располагаются провода расщепленной фазы. Если принять $r_p = m_{cp} / 2 = 1,6 / 2 = 0,8$ м, где (m_{cp} – среднее расстояние между контактными проводом и несущим тросом), то после вычисления по формуле (11) получим $\rho_K = 0,095$ м.

Значения собственных и взаимных емкостей проводников (рис.2) получаем с использованием (10):

$$C_{11} = \frac{(\alpha_{22} - \alpha_{12})}{\Delta}; C_{22} = \frac{(\alpha_{11} - \alpha_{12})}{\Delta}; C_{12} = \frac{\alpha_{12}}{\Delta}; \Delta = \alpha_{12}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2. \quad (12)$$

Здесь в (12) Δ – определитель системы (9).

Ниже рассматривается расчет для простейшего случая индикации рабочего напряжения в секции контактной подвески однопутного участка тяговой сети без дополнительных проводов с помощью БИН на основе ЖКИ. Предполагается проведение индикации в середине пролета между опорами

контактной сети при нахождении оператора на оси рельсового пути. В качестве антенны принят металлический стержень радиусом $\rho_2 = 0,006$ м и длиной $l_3 = 1$ м. Антенна располагается горизонтально вдоль оси пути на высоте $h = 1,8$ м, удобной для наблюдения за показаниями индикатора. В этих условиях ширина сближения антенны с контактной подвеской $a = 0$ (рис. 3). В этом случае в расчетах по (10) следует учесть, что $D_{12} = b_1 + h$ и $d_{12} = b_1 - h$. Расчет проводится с использованием (1), (10), (11), (12) по выражению (8). Проводим расчет емкости C_{III} для заданного значения управляющего напряжения U_y , обеспечивающего условие $U_y \geq U_{пор}$. Расчет проводится методом уравнивания левой и правой частей уравнения (8) путем изменения X_{CO} . Расчет показал, что для срабатывания индикатора при выбранном пороге срабатывания $U_{пор} = U_y = 3В$ [7] требуется включить между антенной и подложкой ЖКИ конденсатор емкостью $C_{III} = 7500$ пФ. При этом срабатывание индикатора будет гарантировано при описанных выше условиях и при заданной высоте его расположения. При уменьшении высоты расположения индикация будет отсутствовать.

Таким образом, в статье показана возможность создания бесконтактных индикаторов наличия напряжения в отключенных и не заземленных секциях контактной сети переменного тока. Индикаторы на основе свойств жидкокристаллических структур не требуют встроенных источников питания и обладают простейшей конструкцией и электрической схемой, не содержит дополнительных сложных электронных схем, что повышает надежность их работы и не требует больших экономических затрат на изготовление. Такие конструкции могут служить как минимум дополнительным средством к традиционным способам определения наличия или отсутствия рабочего напряжения в отключенных секциях контактной сети перед началом производства работ. При этом повышается электробезопасность персонала, и улучшаются условия охраны труда.

Долговечность таких индикаторов определяется минимальной наработкой ЖКИ и составляет для указанного ЖК индикатора не менее 15000 часов непрерывной работы. Для более сложных конфигураций контактной сети участков расчет параметров индикатора может быть проведен с помощью [11].

Литература

1. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. – 480 с.
2. Капкаев, А.А., Бойко А.В. О возможности применения бесконтактной передачи электроэнергии для питания маломощных потребителей от проводников контактной сети электрических железных дорог переменного тока // Инженерный вестник Дона, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6158
3. Xu L., Li Y., Yu J., Hou X., An C. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency // proc. 2006 International Conference on Power System Technology, Oct. 22-26., 2006, Chongqing, China: IEEE, 2006. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.3214936.
4. J. Liu, W. Ruan, S. Fortin and F.P. Dawalibi, “Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis”, in proc. Proceedings. International Conference on Power System Technology, Oct. 13-17, 2002, Kunming, China, pp. 401-408.
5. Яковлев, Н.И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электронной аппаратуры /. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
6. Семенов, Ю.Г. Использование свойств жидкокристаллических структур для бесконтактных индикаторов напряжения без источника питания в высоковольтных электрических сетях / Практическая силовая электроника: науч.-техн. журнал. – М.: ММП-Ирбис, 2023. №4.– С. 45-48.

7. Пароль, Н.В., Кайдалов С.А. Знакосинтезирующие индикаторы и их применение: справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 128 с.
8. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. 8-е изд. перераб. и доп. /– М: Высшая школа, 1986. – 360 с.
9. Александров, Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды /– Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.
10. Хакиев, З.Б., А.С. Каспржицкий, Г.И. Лазоренко СВЧ метод определения положения контактного провода электрифицированных железных дорог / Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2367
11. Semenov Y.G., Bodrov, P.A., N.A. Popova N.A. Determination of Capacitive Couplings between Multiwire Overhead Contact System and Adjacent Lines / Proceedings 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE. 2019. – pp. 606 – 610. IEEE Catalog Number : CFP19F42-USB. ISBN: 978-1-5386-8118-3]. 978-1-5386-8119-0/19.

References

1. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Osnovy elektromagnitnoj bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of railway transport power supply systems]. М.: Intekst, 2008. 480 p.
 2. Каркаев, А.А., Воjко А.В. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6158
 3. Hu L., Li Y., Yu J., Hou X., An C. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency proc. 2006 International Conference on Power System Technology, Oct. 22-26., 2006, Chongqing, China: IEEE, 2006. pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.3214936.
-



4. J. Liu, W. Ruan, S. Fortin and F.P. Dawalibi, "Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis", in proc. Proceedings. International Conference on Power System Technology, Oct. 13-17, 2002, Kunming, China, pp. 401-408.
5. Yakovlev, N.I. Beskontaktnye elektroizmeritel'nye pribory dlya diagnostirovaniya elektronnoj apparatury [Non-contact electrical measuring instruments for diagnosing electronic equipment] L. Energoatomizdat, 1990. 256 p.
6. Semenov, Y.G. Prakticheskaya silovaya elektronika.: nauch.-tekhn. zhurnal. M.: MMP-Irbis, 2023. №4. pp.45-48.
7. Parol', N.V., Kajdalov S.A. Znakosinteziruyushchie indikatory i ih primeneniye: spravochnik [Sign-synthesizing indicators and their application: a reference book]. M.: Radio i svyaz', 1989. 128 p.
8. Bessonov, L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole: uchebnik dlya elektrotekhn., energ., priborostroit. spec. vuzov 8-e izd. pererab. i dop. [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field.] M: Vysshaya shkola, 1986. 360 p.
9. Aleksandrov, G. N. Ustanovki sverhvyssokogo napryazheniya i ohrana okruzhayushchej sredy [EHV installations and environmental protection]. L.: Energoatomizdat, 1989. 360 p.
10. Hakiev, Z.B., A.S. Kasprzhickij, G.I. Lazorenko Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2367
11. Semenov Y.G., Bodrov, R.A., N.A. Popova N.A. Determination of Capacitive Couplings between Multiwire Overhead Contact System and Adjacent Lines Proceedings 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE. 2019. pp. 606 - 610. IEEE Catalog Number: CFP19F42-USB. ISBN: 978-1-5386-8118-3]. 978-1-5386-8119-0/19.

Дата поступления: 15.04.2024 Дата публикации: 30.05.2024
