



Моделирование процессов в тяговой сети и параметры подключения блокировки



Лада ЗАТОРСКАЯ

Lada P. ZATORSKAYA

Modeling Processes in the Traction Network and the Parameters for Connecting the Interlocking

(текст статьи на англ. яз. –
English text of the article – p. 84)

Исследован процесс прохода поезда под током по ветвям изолирующего воздушного промежутка тяговой сети постоянного тока, показаны причины отключения ветви, на которую въезжает поезд. Для решения целевых задач повышения производительности и снижения издержек в работе электрифицированного железнодорожного транспорта предложена схема блокировки несанкционированного срабатывания быстродействующего выключателя. С помощью моделирования процесса изменения тока в сети определены параметры дополнительной катушки магнитопровода реле-дифференциального шунта для подключения блокирующего устройства.

Ключевые слова: железная дорога, тяговая сеть, реле-дифференциальный шунт, схема блокировки, имитационное моделирование, параметры катушки магнитопровода.

Заторская Лада Павловна – соискатель кафедры «Электроэнергетика транспорта», помощник проректора по организационно-производственной работе Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Электрифицированная железная дорога – система сложнейших технических сооружений. Одним из показателей их эффективности является увеличение пропускной способности линий. Особое значение при этом приобретает состояние тяговой сети. Ведь при каких-то сбоях в движении, неожиданной остановке одного подвижного состава вынужденно происходит задержка и других находящихся на перегоне поездов. И важно не просто определить причины остановки, нужно знать все возможные последствия.

ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Постоянное воздействие метеорологических факторов, механических и тепловых нагрузок, электромагнитных полей, искрения приводит к отказу элементов тяговой сети, сопровождающемуся уменьшением её сопротивления с резким увеличением тока, что приводит к коротким замыканиям. В аварийном режиме короткого замыкания, возникающего по самым различным причинам, нарушается работа системы тягового электроснабжения, происходят сбои в движении поездов.

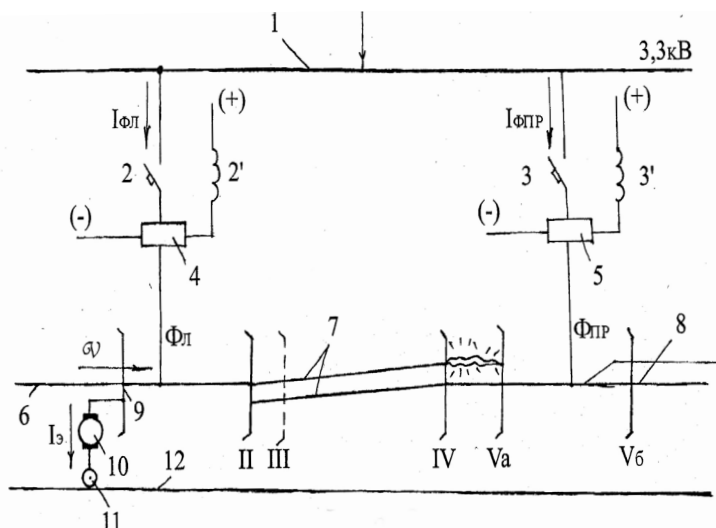


Рис. 1. Процесс движения электроваза по ветвям изолирующего воздушного промежутка.

Токи короткого замыкания, возникшего вблизи тяговой подстанции (при так называемых близких коротких замыканиях), могут превышать величину нормальных токов нагрузки в 20–40 раз. Такие величины даже при очень малой длительности в результате динамического воздействия могут привести к разрушению коммутационных аппаратов и различных конструкций.

В то же время, токи короткого замыкания, возникшего на значительном расстоянии от тяговой подстанции (так называемые удаленные), в отдельных случаях настолько малы, что их значение не достигает уровня обычных токов нагрузки. При длительном воздействии малого тока короткого замыкания выделяющееся тепло в месте контакта с заземленным элементом может вызвать пережог контактного провода, особенно при возникновении электрической дуги.

Кроме аварийных режимов работы тяговой сети существуют штатные ситуации, при которых параметры токов и напряжений фидеров контактной сети близки по значению к параметрам короткого замыкания.

Во всех названных случаях значение тока питающего фидера изменяется скачкообразно, что может привести к неселективной работе быстродействующего выключателя фидера, отключению зоны питания, остановке поезда, возникновению электрической дуги и пережогу контактного провода.

Тяговые нагрузки в штатном режиме в отличие от нагрузок других потребителей электроэнергии характеризуются особыми, присущими только им свойствами: значение их все время изменяется, а изменения носят случайный и нарастающий характер. Аналогичные по характеру изменения тока наблюдаются при аварийных режимах.

Соизмеримость значений токов в различных ситуациях указывает на сложность в их классификации. В таких условиях работа устройств защиты от токов короткого замыкания в тяговой сети постоянно приобретает определенную специфику.

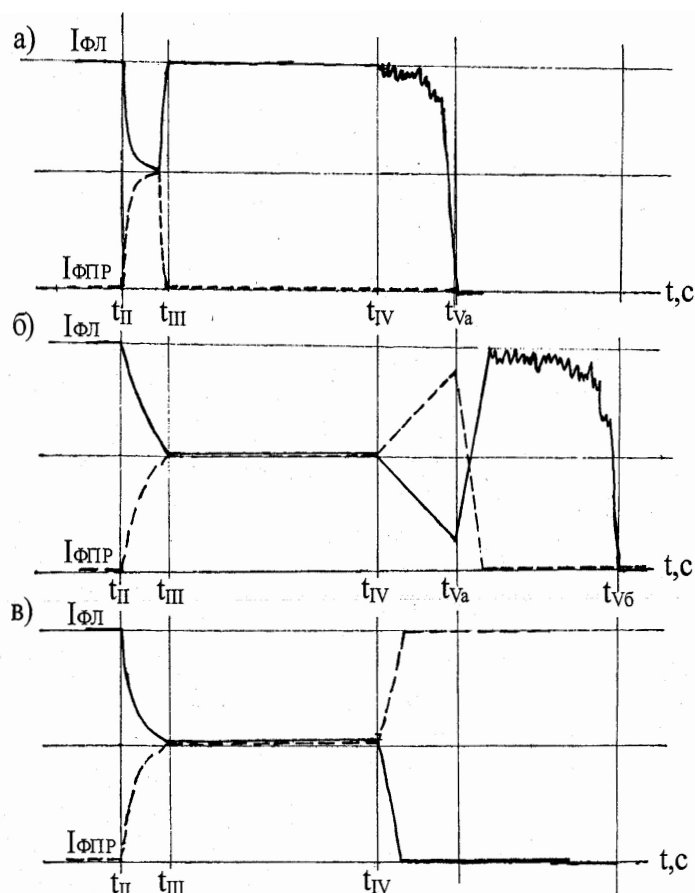
Надо отметить, что для определения возможной причины отключения фидерных быстродействующих выключателей следует на протяжении длительного времени осциллографировать процесс изменения тока в тяговой сети (переходные процессы тока и напряжения фидера непосредственно перед отключением и во время него).

Одним из основных направлений исследования является определение множества параметров в работе тяговой сети с использованием моделирования процессов и на основе полученных данных построение характеристик с целью прогнозирования свойств и модернизации отдельных устройств защиты.

Проблема эта известна и ей посвящены труды многих ученых и организаций, интересующихся вопросами тяговой сети постоянного тока и ее надежности. Широ-



Рис. 2. Процесс перераспределения токов по ветвям питания изолирующего воздушного промежутка.



ким спектром исследований занята, в частности, швейцарская компания Secheron [1].

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЛЕ-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ШУНТОВ

Скачки тока в сети возникают по разным причинам. Рассмотрим одну из них: во время замыкания токоприёмником электровоза под током ветвей изолирующего воздушного промежутка тяговой сети постоянного тока. Ток нагрузки, доставляемый ранее по левому фидеру, по которому двигался электровоз, перераспределяется между данным и подключившимся правым фидером (рис. 1).

Происходит отрицательный скачок тока на левом фидере, по которому двигался электровоз, и такой же положительный скачок на подключившемся правом фидере. На рис. 2в изображен идеальный процесс перераспределения токов между питающими фидерами.

Скачкообразное изменение тока приводит к срабатыванию быстродействующих

устройств смежных фидеров и несанкционированному отключению зоны питания (рис. 2а, б). Защита смежных фидеров тяговой сети постоянного тока осуществляется с помощью неполяризованных выключателей и первичных датчиков защиты — реле-дифференциальных шунтов (РДШ). Из-за срабатывания реле-дифференциального шунта в ответ на скачок тока отключение ветви правого фидера, на которую въезжает электровоз под током, может произойти в момент t_{II} касания токоприёмника ветви (рис. 2а). Если же отключения в момент t_{II} не произошло, то с еще большей вероятностью по той же причине оно произойдет в момент t_{IV} съезда с ветви левого фидера, по которой двигался электровоз (рис. 2б).

Реле-дифференциальный шунт представляет собой магнитопровод 9 (рис. 3) с якорем 7. Внутри магнитопровода дифференциально проходят шины 1 и 2 неравного сечения, причем на шине меньшего сечения 1 насажены пакеты с железом 3.

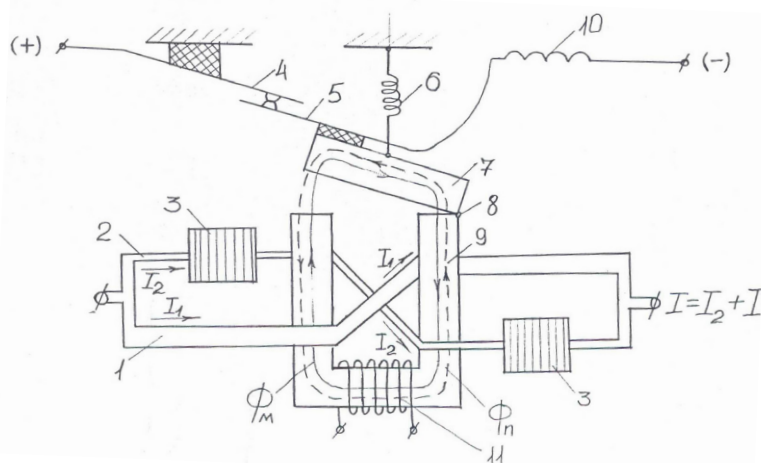


Рис. 3. Схема реле-дифференциального шунта с дополнительной катушкой.

Якорь с закрепленным на нем подвижным контактом 5 оттянут ориентирующей пружиной 6 до упора с неподвижным контактом 4 (контакты нормально замкнуты). Создаваемая от изменения тока в сети разница токов в шинах вызывает в магнитопроводе магнитный поток Φ_m такой силы, которая, преодолев силу натяжения пружины, притягивает якорь к магнитопроводу, разъединяя при этом подвижный и неподвижный контакты. Происходит срабатывание первичного датчика защиты и отключение питающего фидера.

Если принять, что нарастание тока происходит по экспоненциальному закону (что близко к действительности), то характеристики срабатывания реле описываются тремя параметрами:

- величиной установившегося тока, предшествующего приращению (скачку) тока I_{1*} ;
- величиной приращения (скачка) тока ΔI_{1*} ;
- постоянной времени приращения (скачка) тока T_1 .

На рис. 4 (величины I_{1*} и ΔI_{1*} указаны в относительных единицах) видно, например, что при предшествующей нагрузке на фидере I_{2*} и последующем приращении тока ΔI_{2*} реле сработает, если постоянная времени приращения тока равна T_1 (область срабатывания реле для скачков с постоянной времени T_1 отштрихована) и не сработает, если постоянная времени скачка равна T_2 .

То есть при неизменной постоянной времени сети T_1 , не зависящей от I_* , вы-

ключатель работает только от скачка тока величиной ΔI_{1*} или только от установившегося значения тока ΔI_{1*} , если ему предшествовал установившийся ток I_{1*} .

Величина I_{1*} является статической, а величина ΔI_{1*} — динамической уставками выключателя. Динамическая уставка ΔI_{1*} зависит от постоянной времени сети T_1 .

В реальных условиях постоянная времени сети T_1 сложным образом зависит от установившегося значения тока I_* . Поэтому при построении характеристики срабатывания выключателя для определенного участка необходимо знать как меняется его динамическая уставка по мере изменения постоянной времени сети T_1 . На практике широко применяется моделирование процессов в тяговой сети или на каком-либо техническом элементе. В частности, графики изменения токов в тяговой сети,

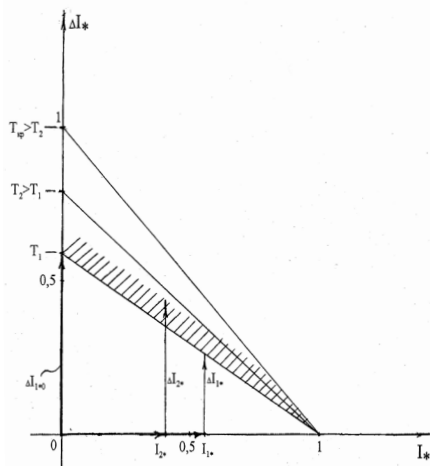


Рис. 4. Характеристика срабатывания реле-дифференциального шунта.



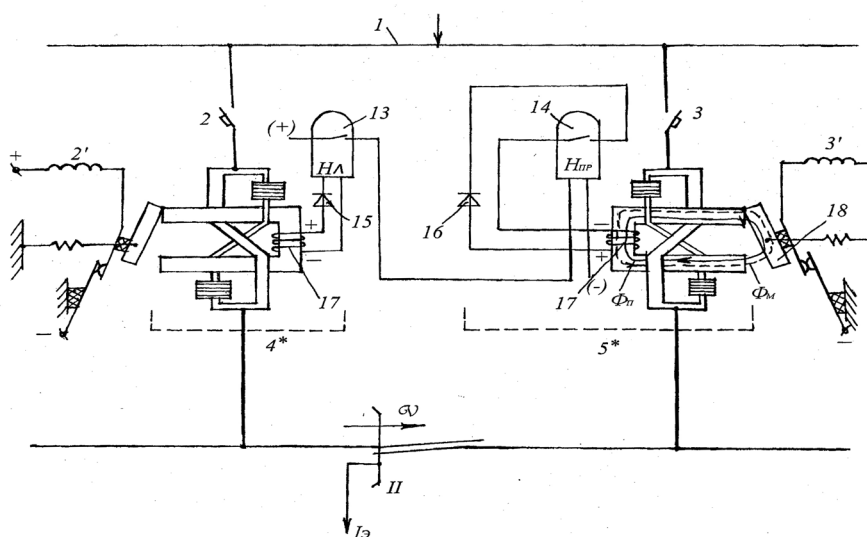


Рис. 5. Схема блокировки с помощью реле напряжения.

полученные таким образом, служат основой для дальнейшей модернизации устройств.

Характер нарастания тока в сети и постоянная времени сети являются объектами исследования Secheron [1], что подтверждается приведенными характеристиками — результатами динамического моделирования сети постоянного тока по разработанному программному обеспечению. В основу положено программное моделирование для расчета системы питания, падения напряжения вдоль линии, расчета оптимальных параметров быстродействующих выключателей, создания схемы защиты.

ПРИЧИНЫ ЛОЖНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ

Реле-дифференциальный шунт [2] поразному реагирует на медленные и быстрые изменения тока фидера, и срабатывание его в переходном режиме определяется указанными выше тремя параметрами (в относительных единицах).

Это устройство позволяет отключить фидер тяговой сети при малом значении быстро изменяющегося тока. Однако это же свойство РДШ и становится причиной ложных отключений выключателей фидеров при въезде на изолирующий воздушный промежуток подвижного состава под током. Начиная с момента отрыва токоприёмника электровоза с ветви изолирующего воздушного промежутка, питаемой

левым фидером, и въезда на отключенную зону правого фидера, движение электровоза происходит за счет поддержания питания только от левого фидера, вызывая появление дуги.

Причина пережогов проводов изолирующего промежутка заключается в ложной работе реле-дифференциального шунта по скачку тока и, следовательно, устранить причину пережогов можно, лишь устранив ложные отключения. Для решения вопроса есть два пути.

Один из них состоит в устранении реакции реле-дифференциального шунта на приращение (скачки) тока. Однако этот путь нежелателен, потому что тем самым одновременно устраняется возможность реле реагировать на малые токи короткого замыкания, что может быть чревато еще более неприятными последствиями — отжигом проводов контактной сети.

Другой путь представляется более эффективным. Он предполагает введение специальных блокировок, предотвращающих отключение по скачку тока выключателей смежных фидеров, питающих ветви изолирующих воздушных промежутков тяговой сети постоянного тока.

СХЕМА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ШУНТА

В схеме (рис. 3) модернизация заключается в том, что на магнитопроводе реле-дифференциального шунта намотана до-

полнительная катушка 11. Блокировка срабатывания достигается путем соединительной схемы блокировки и демпфирования магнитного потока Φ_m в магнитопроводе реле-дифференциального шунта противотоком Φ_p (рис. 5).

При касании токоприёмником электрова обеих ветвей воздушного промежутка возникнут одинаковые по величине скачки тока — отрицательный ($-DI\phi 1$) на левом фидере и положительный ($+DI\phi 3$) на правом. Отрицательным скачком тока на левом фидере наводится напряжение на его дополнительной катушке, которое заставляет сработать реле напряжения левого фидера 13, поскольку направление тока в цепи катушки при этом совпадает с проводящим направлением диода 12. Вследствие этого реле напряжения замыкает свои нормально разомкнутые контакты, через которые подается напряжение оперативного постоянного тока на катушку реле напряжения правого фидера 14. Последнее срабатывает и своими контактами замыкает дополнительную катушку 11 реле-дифференциального шунта через диод фидера.

В это же время положительный скачок тока на правом фидере наведет в его дополнительной катушке напряжение, направление которого совпадает с проводящим направлением диода 15. В результате по дополнительной катушке начинает протекать ток. Поток Φ_p в магнитопроводе реле-дифференциального шунта фидера, создаваемый этим током, по закону Ленца противоположен потоку Φ_m , создаваемому положительным скачком тока $+DI\phi 3$ в магнитопроводе шунта правого фидера. Поэтому суммарный поток магнитопровода ($\Phi_m - \Phi_p$) будет близок к нулю и первичный датчик защиты правого фидера на положительный скачок тока не прореагирует, т.е. его ложные срабатывания от скачка тока будут исключены.

Величина скачка тока фидера $-DI\phi 1$, вызывающая указанную работу устройства, регулируется величиной уставки по напряжению реле напряжения левого фидера.

Данное устройство с его характеристиками позволяет не отключаться первичному датчику защиты от скачка оперативного тока во время проезда по ветвям изолирующего воздушного промежутка токоприёмника электрова под током, но в то же

время обеспечивает отключение зоны при возникновении на ней короткого замыкания.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЕЗДА ЭЛЕКТРОВОЗА

Срабатывание реле-дифференциального шунта обусловлено возникновением в его магнитопроводе магнитного потока, зависящего от разницы токов в его шинах неравного сечения, создаваемой изменением тока в сети.

Скачки токов в сети и шинах реле-дифференциальных шунтов смежных фидеров при движении токоприёмника электрова по ветвям изолирующего воздушного промежутка тяговой сети постоянного тока имеют характер переходного процесса. Моделирование процесса формируется путем построения трёх последовательных этапов [3]:

- движение токоприёмника электрова по ветви тяговой сети, питаемой левым фидером (рис. 6а);

- движение электрова по двум ветвям изолирующего воздушного промежутка и питание его левым и правым фидерами (рис. 6б);

- отрыв токоприёмника электрова от ветви изолирующего воздушного промежутка, питаемой левым фидером, и движение токоприёмника электрова по ветви тяговой сети, питаемой правым фидером (рис. 6в).

Целью моделирования является определение зависимости изменения токов в ветвях от времени в конкретный момент с помощью общей электрической схемы участка сети. Все величины схемы принимаются близкими к реальным или же рассчитываются.

Если к моменту съезда пантографа электрова с ветвей изолирующего воздушного промежутка (рис. 6в) выключатель правого фидера отключается, между пантографом и ветвью появляется электрическая дуга.

Результатом моделирования становятся зависимости токов в шинах реле-дифференциального шунта и напряжения в дополнительной катушке в функции времени в течение всего периода моделирования (рис. 7), где:

$I_{об}$ — ток фидера;



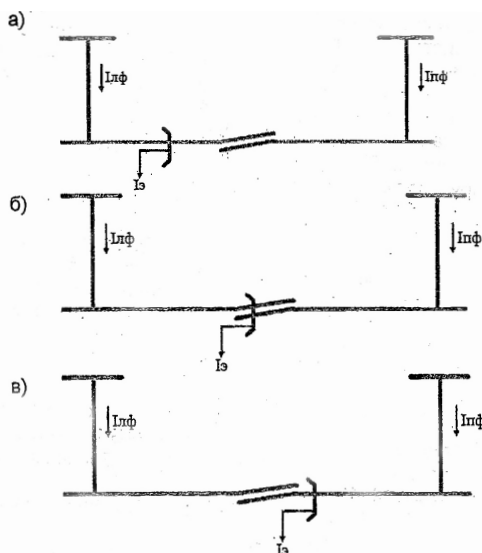


Рис. 6. Этапы моделирования прохода электровоза по ветвям изолирующего воздушного промежутка.

I_1, I_2 — токи в шинах реле-дифференциального шунта меньшего и большего сечения соответственно;

$I_2 - I_1$ — разность токов в шинах реле-дифференциального шунта;

U_k — напряжение в дополнительной катушке реле-дифференциального шунта.

Величина напряжения, наводимого в дополнительной катушке реле-дифференциального шунта, зависит от разницы токов, протекающих по его шинам. На основе полученных данных разработаны параметры схемы блокировки от ложных отключений быстродействующих выключателей смежных фидеров, оборудованных реле-дифференциальными шунтами.

чателей смежных фидеров, оборудованных реле-дифференциальными шунтами.

ПАРАМЕТРЫ КАТУШКИ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ БЛОКИРОВКИ

По результатам моделирования переходного процесса и полученным зависимостям токов и напряжения от времени величина напряжения одного витка дополнительной катушки, расположенной на магнитопроводе реле-дифференциального шунта, равна:

$$U_{1в} = e_{1в} = 25 \cdot 10^{-5} \text{ В.}$$

Подключение выводов дополнительной катушки реле-дифференциального шунта производится к схеме блокировки с использованием реле напряжения типа 5П14А с параметрами $R_p = 28 \text{ Ом}$, $I_p = 25 \text{ мА}$, $U_p = 0,7 \text{ В}$.

Примем величину сопротивления дополнительной катушки значительно превышающей величину сопротивления реле напряжения ($R_{кат} > R_p$). Тогда при использовании катушки с количеством витков $w = 1$ из медного провода диаметром $0,1 \text{ мм}$ и длиной витка 15 см (в соответствии с размерами магнитопровода) сопротивление и ток имеют значения:

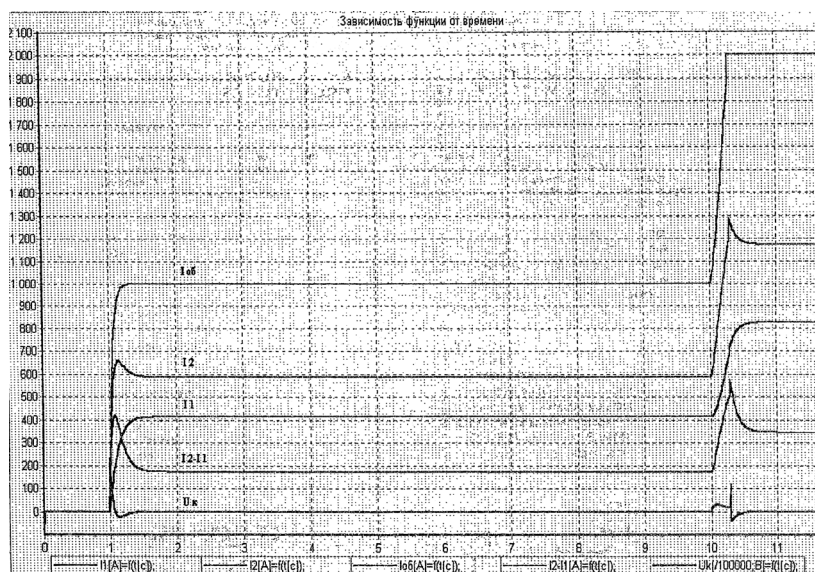
$$R_{1в} = R_{провода} \cdot l_{провода} = 0,34 \text{ Ом,}$$

$$I = e_{1в} \cdot w / R_{1в} \cdot w = 8 \text{ мА.}$$

Необходимая величина тока в 25 мА не обеспечивается.

Для срабатывания реле напряжения необходимо увеличить ток в дополнительной катушке при помощи операционного

Рис. 7. Зависимости токов в шинах реле-дифференциального шунта и напряжения в дополнительной катушке в результате моделирования.



усилителя и делителя тока, позволяющего при увеличенном токе дополнительной катушки обеспечить работу выбранного усилителя с его параметрами.

По рассчитанным ранее параметрам выбираем усилитель УД6, имеющий входное сопротивление $R_{вх\ y} = 1000\ \text{Ом}$ и входной ток $I_{вх\ y} = 5 \cdot 10^{-8}\ \text{А}$, выходное сопротивление $R_{вых\ y} = 50\ \text{Ом}$ и выходной ток $I_{вых\ y} = 25 \cdot 10^{-3}\ \text{А}$.

Для определения количества витков катушки уравнение получает вид:

$$w e_{1в} = R_{1в} w I_{вх\ y} + I_{вх\ y} R_{вх\ y},$$

$$\text{откуда } w = I_{вх\ y} R_{вх\ y} / e_{1в} - R_{1в} I_{вх\ y} = 0,2.$$

То есть достаточно одного витка, чтобы обеспечить работу усилителя по входящим характеристикам.

По полученным данным можно сказать, что величина напряжения на выводах дополнительной катушки, равная входному напряжению усилителя, мала. А наводимое напряжение от оборудования, смонтированного вблизи установки, сравнимо по величине с рассчитанным напряжением одного витка: $e_{1в} \approx e_{навед}$. Для налаженной работы схемы необходимо обеспечить условие: $e_{1в} \gg e_{навед}$, чего можно добиться увеличением числа витков катушки, то есть должно выполняться условие:

$$e_{1в} w \gg e_{навед}.$$

Для окончательного определения количества витков дополнительной катушки, достаточного для работы схемы, зададимся соотношением $R_{вх\ y} = R_{2л} = 1000\ \text{Ом}$:

$$w = (R_{вх\ y} / R_{2л} + 1) \cdot R_{вх\ y} / e_{1в} \cdot (100 R_{2л} + R_{вх\ y} R_{2л} / R_{2л} + R_{вх\ y}) \cdot I_{вх\ y} = 40\ \text{витков}.$$

Из расчётов можно сделать вывод, что для достижения помехоустойчивости предложенной схемы достаточно на магнитопровод реле-дифференциального шунта установить дополнительную катушку с количеством витков, равным 40.

Также на основе результатов моделирования определяется количество витков дополнительной катушки, создающей демпфирующий поток Фп в магнитопроводе реле-дифференциального шунта.

При проходе поезда под током по ветвям изолирующего воздушного промежутка реле напряжения сработает в ключевом режиме.

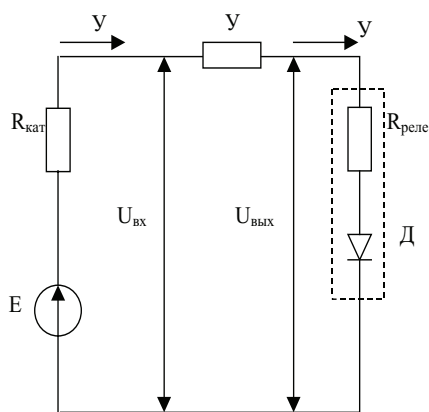


Рис. 8. Схема подключения дополнительной катушки к схеме блокировки.

Если же произойдет короткое замыкание в тяговой сети, дополнительная катушка остается разомкнутой и реле-дифференциальный шунт срабатывает в оперативном режиме, отключая зону питания, где зафиксирован аварийный режим. Кроме того, появляется возможность не заглублять уставку, обеспечивая селективность защиты.

Положительный экономический эффект от применения схемы блокировки доказан расчетами [4], основанными на уменьшении расходов на материалы и оплату труда ремонтных бригад, ранее затрачиваемых на восстановление проводов и конструкций изолирующих воздушных промежутков от перегорев их электрической дугой.

ЛИТЕРАТУРА

1. DC Traction Network, Design and simulation, Secheron SA substations@secheron, www. Secheron.com Copyright 2007 Secheron SA.
2. Пупынин В. Н. Полная теория работы и характеристики параллельных индуктивных шунтов быстрействующих выключателей типов ВАБ-2, АБ-2/3, АБ-2/4 и АБ-2/4 и реле-дифференциальных шунтов выключателей ВАБ-28 // Труды МИИТ. – 1965. – Вып. 213. – С. 61–86.
3. Заторская Л. П. Моделирование переходного процесса при проходе токоприёмника по воздушному промежутку тяговой сети постоянного тока // Вестник МИИТ. – 2002. – Вып. 7. – С. 38.
4. Заторская Л. П. Оценка целесообразности использования блокировки от несанкционированного отключения участка контактной сети постоянного тока // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 3. – С. 45.

Координаты автора: **Заторская Л. П.** – zatorskaya@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 15.08.2016, актуализирована 10.11.2016, принята к публикации 12.11.2016.

