

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

О. С. АНАНЬЕВА, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Неравномерная загрузка тяговых подстанций (ТП), как правило, увеличивает потери электрической энергии как в системе тягового, так и внешнего энергоснабжения. Для уменьшения потерь и обеспечения требуемых технико-экономических показателей режимов работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) применяют ряд мероприятий, способствующих равномерной загрузке всех элементов системы. Одним из таких мероприятий является применение в СТЭ рекуперативного торможения, которое на сегодня является наиболее эффективным методом по снижению энергопотребления. Внедрение накопителей электрической энергии (НЭЭ) как приемников избыточной энергии рекуперации показало положительный результат, который заключается не только в снижении общего энергопотребления по времени, но и в регулировании уровня напряжения в контактной сети.

На данный момент известно большое количество научных работ, в которых рассматриваются вопросы, связанные с внедрением аккумулирующих устройств в систему электроснабжения как постоянного, так и переменного тока, с определением оптимального места размещения НЭЭ, а также массогабаритных и энергетических показателей, обеспечивающих стабильную работу СТЭ.

Приемники избыточной энергии можно располагать как на борту подвижного состава, так и в различных точках СТЭ, а именно: на тяговых подстанциях, на выводах питающих линий; на постах секционирования, в межподстанционной зоне, а также вдоль контактной сети. Выбор оптимального места размещения зависит в свою очередь от ряда показателей, таких как: экономическая эффективность, удобство эксплуатации и обслуживания, его энергетические и массогабаритные показатели, а также капитальные затраты. Кроме того, при выборе рационального места размещения также необходимо учитывать потери мощности и электрической энергии, связанные в первую очередь с особенностями ее резервирования. При определении оптимальных для НЭЭ массогабаритных и энергетических показателей необходимо учитывать не только объем резервируемой энергии от рекуперирующего ЭПС и СТЭ, но и возможность обеспечения экономичного и надежного снабжения потребителей электроэнергией. Поэтому выбор оптимального места размещения НЭЭ в системе электроснабжения железных дорог сегодня остается актуальной задачей.

На кафедре «Локомотивы» Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ) была разработана имитационная модель совместной работы ЭПС и системы электроснабжения с НЭЭ. Предлагаемая модель позволяет также производить расчет токораспределения с учетом НЭЭ в СТЭ, определять оптимальную мощность и место размещения устройства для различных критериев оптимальности с учетом изменения токов нагрузок по времени и различных режимов их работы.

Главным отличием предлагаемого метода расчета от ранее опубликованных является использование в модели схем замещения сложных участков, которые позволяют учитывать квазидетерминированный график движения поездов, основные элементы СТЭ, токи электрического подвижного состава (ЭПС) как в режиме тяги, так и в режиме рекуперации, а также основные режимы работы НЭЭ и его расположение в СТЭ. Одним из этапов работы представленной модели является составление и расчет мгновенных схем.

Для определения токов и напряжений в системе тягового и внешнего энергоснабжения расчет подобных мгновенных схем с учетом основных режимов работы ЭПС и НЭЭ, а также места их расположения в СТЭ необходимо решать многократно, что в свою очередь значительно увеличивает затраты времени на их производство. Данную задачу можно упростить, если воспользоваться специальными методами расчета, предназначенными для анализа сложных электрических цепей. Одним из таких методов является метод узловых потенциалов на основе матрично-

топологического подхода формализации электрических схем. Выбор данного метода объясняется тем, что данный метод широко применяется в программах компьютерного моделирования сложных электрических цепей, а форма записи алгоритма формирования узловых уравнений по данному методу отличается его простотой.

Большим преимуществом матричной формы записи, по сравнению с другими формами, при расчете множества мгновенных схем является ее компактность, краткость и отсутствие излишней громоздкости, а также возможность учета большого количества изменяющихся во времени параметров.

В качестве исходных данных для рассматриваемой методики использовались: принципиальная схема электроснабжения участка, параметры рассматриваемого участка, СТЭ и НЭЭ, результаты тяговых расчетов, а также сведения о графиках движения поездов.

Особенностью предлагаемой методики расчета сложных электрических цепей для рассматриваемой схемы замещения является тот факт, что сопротивления ветвей, с подвижным составом, находящимся либо в режиме тяги, либо в режиме рекуперации, бесконечно велики и зависят от напряжения.

В общем случае по методу узловых напряжений для электрической цепи, состоящей из n_u узлов, необходимо составлять $n_u - 1$ узловых уравнений. Для сложной электрической цепи, имеющей $n + 1$ узел, уравнения, записанные по методу узловых напряжений в матричной форме, имеют вид

$$[G][\Phi]=[J], \quad (1)$$

где $[G]$ – квадратная матрица узловых проводимостей; $[\Phi]$ – матрица узловых потенциалов; $[J]$ – матрица узловых токов.

Система узловых уравнений для расчета совместной работы СТЭ постоянного тока и ЭПС с НЭЭ имеет вид

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для упрощения дальнейших расчетов матрицы разбиваются на блоки в соответствии с принятым порядком нумерации элементов схемы. Тогда уравнения, записанные по методу узловых напряжений в блочной форме, имеют вид

$$\frac{ag_a a^T + bg_b b^T + dg_d d^T}{fg_b b^T} \begin{bmatrix} bg_b f^N \\ fg_b f^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ag_a E_a + dg_d E_d \\ gJ_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

После элементарных преобразований системы уравнений (3) рассчитываются потенциалы узлов с последующим определением напряжений и токов в каждой ветви схемы, а также расхода электрической энергии, с учетом потерь мощности и электрической энергии.

На основании вышеизложенных результатов можно сделать следующие выводы.

1 Разработанная методика формализации сложных электрических цепей методом узловых потенциалов на основе матрично-топологического подхода может быть использована при моделировании совместной работы СТЭ постоянного тока и ЭПС с использованием НЭЭ.

2 Данная методика также может быть использована при определении оптимальной емкости и места размещения НЭЭ в СТЭ постоянного тока с учетом квазидетерминированного графика движения и величины тока подвижного состава, находящегося как в режиме тяги, так и в режиме рекуперации.

3 Представленный алгоритм формирования узловых уравнений в матричной форме позволяет, по сравнению с другими аналогичными методами расчета, автоматизировать составление и расчет множества мгновенных схем даже при большом количестве элементов СТЭ, что в дальнейшем позволит как исключать, так и включать в расчет дополнительные элементы электроснабжения.

4 Предложенная методика представления метода узловых потенциалов позволяет в значительной степени сократить размеры матриц, подлежащих дальнейшему преобразованию, что позволяет значительно снизить затраты времени на проведение вычислений.