



В.П.Закарюкин, А.В.Крюков, С.М.Асташин

Учет изменений нагрузок нетранспортных потребителей при моделировании систем тягового электроснабжения

Система тягового электроснабжения (СТЭ) магистральной железной дороги переменного тока представляет собой сложный нелинейный динамический объект, учитывающий электрические и электромеханические переходные процессы, для формального описания которого может быть использована следующая модель:

$$\mathbf{X}(t) = \Phi_t[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)], \quad (1)$$

где $\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$ – вектор параметров, характеризующих режим СТЭ; $\Phi_t[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)] = [\varphi_{t1}[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)] \ \varphi_{t2}[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)] \ \dots \ \varphi_{tm}[\mathbf{Y}(t), \mathbf{C}(t), \mathbf{S}(t)]]^T$ – нелинейный, динамический оператор, в общем случае зависящий от времени; $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_m(t)]^T$ – вектор возмущающих воздействий; $\mathbf{C}(t) = [c_1(t) \ c_2(t) \ \dots \ c_r(t)]^T$ – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_p(t)]^T$ – вектор структурных параметров СТЭ.

В качестве параметров $\mathbf{X}(t)$ обычно используются декартовы (U_i', U_i'') или полярные координаты (U_i, δ_i) узловых напряжений. Параметры $\mathbf{Y}(t)$ представляют собой изменяющиеся во времени и перемещающиеся в пространстве активные P_i и реактивные Q_i тяговые нагрузки. Вектор управлений $\mathbf{C}(t)$ формируется на основании детерминированного или случайного графика движения поездов. Структурные параметры $\mathbf{S}(t)$ включают в свой состав в основном элементы матрицы проводимостей, отвечающей электрической сети СТЭ.

Ввиду большой размерности, сложности и недостаточной информационной обеспеченности СТЭ практическое использование модели (1) на современном этапе не представляется возможным. Поэтому для определения режимов СТЭ применяют имитационные методы [1–6]. При этом используется концепция так называемых «мгновенных»⁹ схем [7] и осуществляется редукция динамической модели (1) к набору статических моделей. Для выполнения процедуры моделирования исследуемый интервал T_M разбивается на малые промежутки Δt , внутри которых параметры $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\mathbf{C}$ и $\mathbf{S}$ принимаются неизменными. Анализ измерений параметров режима в реальных СТЭ [5], а также результаты компьютерного моделирования показывают, что такое допущение является приемлемым и не вносит заметной погрешности в результаты расчетов.

Создание имитационной модели (ИМ) системы электроснабжения железнодорожной магистрали требует построения моделей элементов СТЭ с определением алгоритма их взаимодействия и включает следующие составные части:

- моделирование графика движения поездов;
- формирование мгновенных схем и расчет режима для каждой из них;
- выборка результатов расчета и определение интегральных показателей имитационного моделирования.

На каждом интервале моделирования Δt осуществляется решение следующей нелинейной системы уравнений, описывающей установившийся режим соответствующей мгновенной схемы:

$$\mathbf{F}[\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{S}_k] = \mathbf{0}, \quad (2)$$

где $\mathbf{X}_k, \mathbf{Y}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{S}_k$ – значения векторов $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{C}, \mathbf{S}$ для k -ой мгновенной схемы.

Описанный алгоритм реализован в комплексе программ Fazonord «Расчеты режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения в фазных координатах» [8].

Однофазная СТЭ связана с рядом других подсистем, активно взаимодействующих друг с другом (рис. 1). К их числу можно отнести трехфазную электроэнергетическую систему (ЭЭС) и районы электроснабжения (РЭС) нетяговых

⁹ Под мгновенными понимаются схемы СТЭ с расположением поездов в определенный момент времени [7].

и нетранспортных потребителей, включающие линии электропередачи нетрадиционного типа, выполненные по схеме «провод – рельс» и «два провода – рельс». Объединенная система электроснабжения (ОСЭ) железнодорожной магистрали характеризуется большой размерностью и сложностью взаимосвязей.

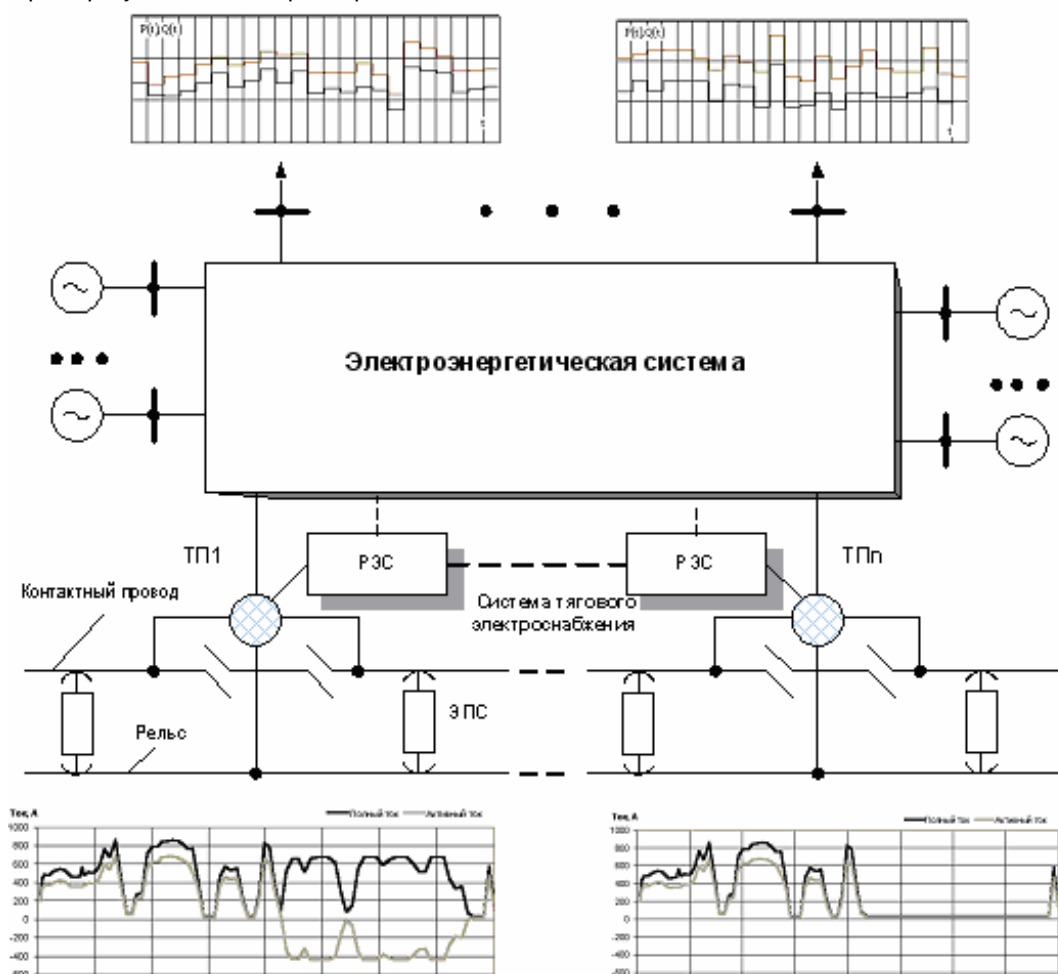


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения железнодорожной магистрали

При моделировании ОСЭ вектора параметров могут быть представлены в виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_T \cup \mathbf{X}_S \cup \mathbf{X}_R; \mathbf{Y} = \mathbf{Y}_T \cup \mathbf{Y}_S \cup \mathbf{Y}_R; \mathbf{C} = \mathbf{C}_T \cup \mathbf{C}_S \cup \mathbf{C}_R; \mathbf{S} = \mathbf{S}_T \cup \mathbf{S}_S \cup \mathbf{S}_R,$$

где индексом Т обозначены параметры, относящиеся к СТЭ, индексом S – параметры ЭЭС, а индексом R – параметры РЭС. При этом уравнения (2), решаемые на каждом шаге имитационного моделирования, принимают вид

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_T(\mathbf{X}_T[k], \mathbf{X}_S[k], \mathbf{X}_R[k], \mathbf{Y}_T[k], \mathbf{Y}_S[k], \mathbf{Y}_R[k], \mathbf{C}_T[k], \mathbf{C}_S[k], \mathbf{S}_R[k], \mathbf{S}_S[k], \mathbf{S}_R[k]) &= \mathbf{0}; \\ \mathbf{F}_S(\mathbf{X}_T[k], \mathbf{X}_S[k], \mathbf{X}_R[k], \mathbf{Y}_T[k], \mathbf{Y}_S[k], \mathbf{Y}_R[k], \mathbf{C}_T[k], \mathbf{C}_S[k], \mathbf{C}_R[k], \mathbf{S}_T[k], \mathbf{S}_S[k], \mathbf{S}_R[k]) &= \mathbf{0}; \\ \mathbf{F}_R(\mathbf{X}_T[k], \mathbf{X}_S[k], \mathbf{X}_R[k], \mathbf{Y}_T[k], \mathbf{Y}_S[k], \mathbf{Y}_R[k], \mathbf{C}_T[k], \mathbf{C}_S[k], \mathbf{C}_R[k], \mathbf{S}_T[k], \mathbf{S}_S[k], \mathbf{S}_R[k]) &= \mathbf{0}. \end{aligned}$$

Методология имитационного моделирования, предложенная в [5, 6] и реализованная в комплексе Fazonord, позволяет осуществлять расчеты режимов и нагрузочной способности ОСЭ железнодорожной магистрали. При этом в алгоритм ИМ добавляется этап моделирования графиков изменения нетяговых и нетранспортных нагрузок, питающихся от сетей ЭЭС и РЭС.

Вопросы влияния СТЭ на режимы ЭЭС рассмотрены в [9]. В настоящей статье обсуждаются вопросы влияния динамики изменения нагрузок ЭЭС и РЭС на режимы СТЭ. Расчеты выполнялись применительно к схеме реальной ОСЭ, схема которой показана на рис. 2. Продольный профиль участка железной дороги представлен на рис. 3. Профиль токопотребления поезда на участке показан на рис. 4.

Графики тяговых нагрузок электропоезда (ЭПС) и нетяговых нагрузок подстанции ТП6 приведены на рис. 5 и 6. Расчетная схема, сформированная средствами комплекса Fazonord, показана на рис. 7.

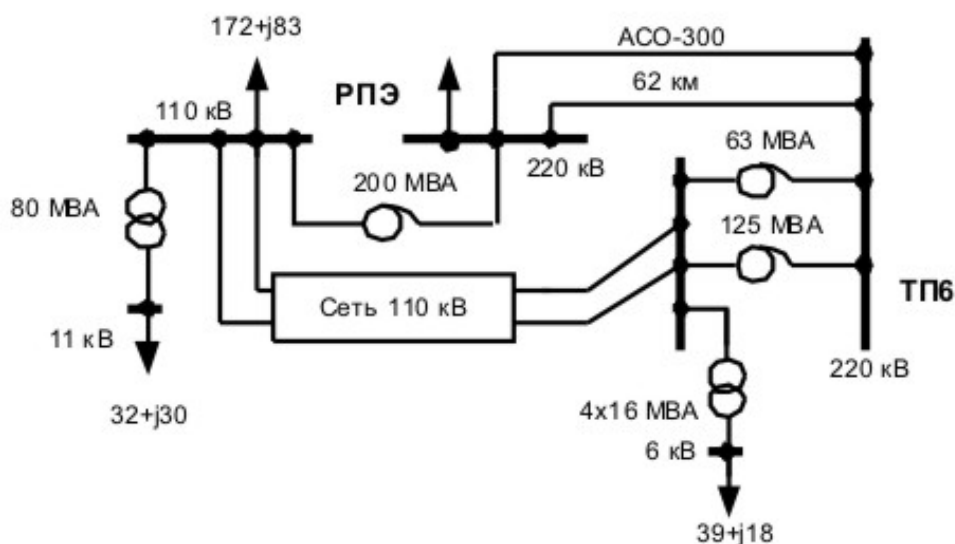


Рис. 2. Схема ЭЭС: РПЭ – районная подстанция энергосистемы

Высота, м

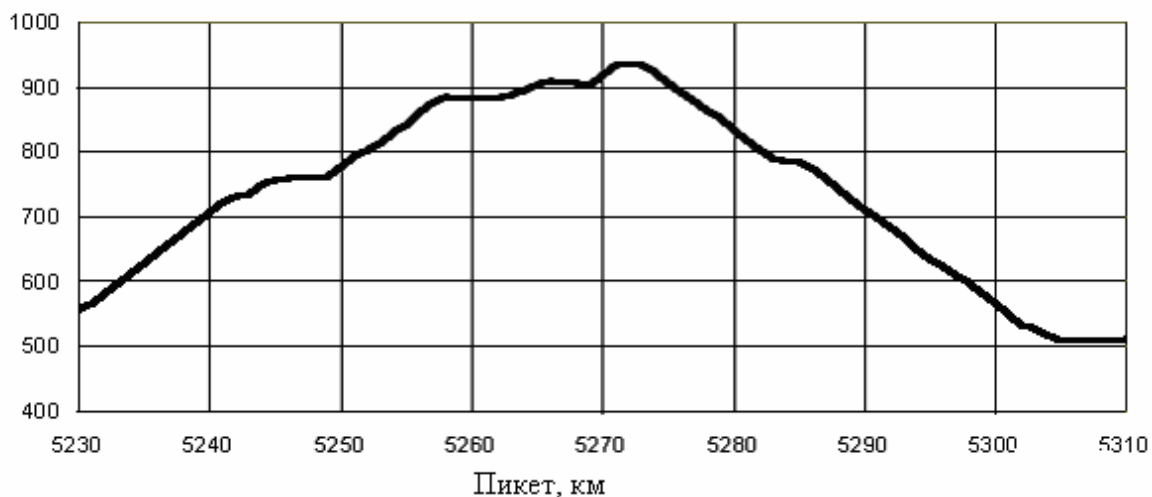


Рис. 3. Продольный профиль участка

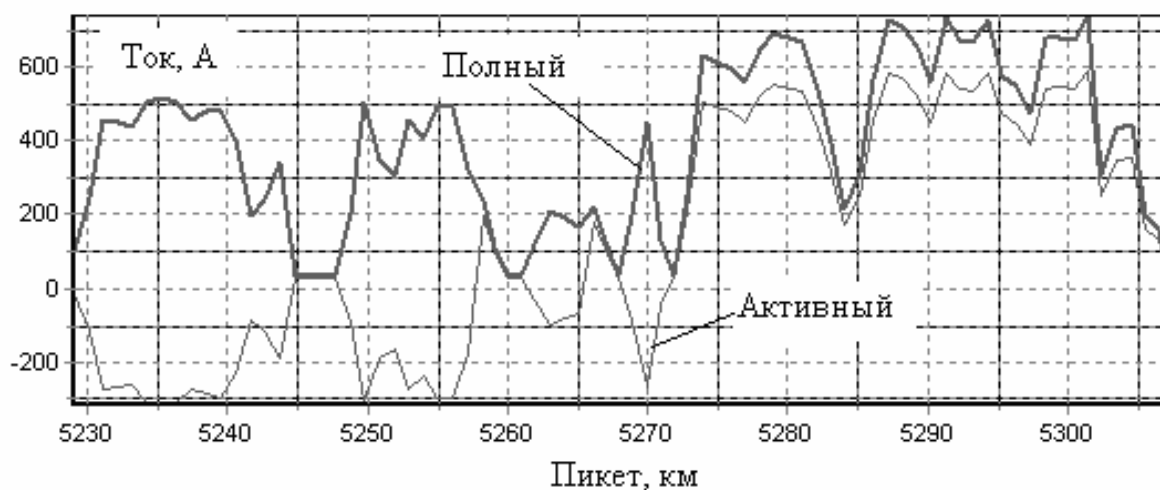


Рис. 4. Токовый профиль поезда

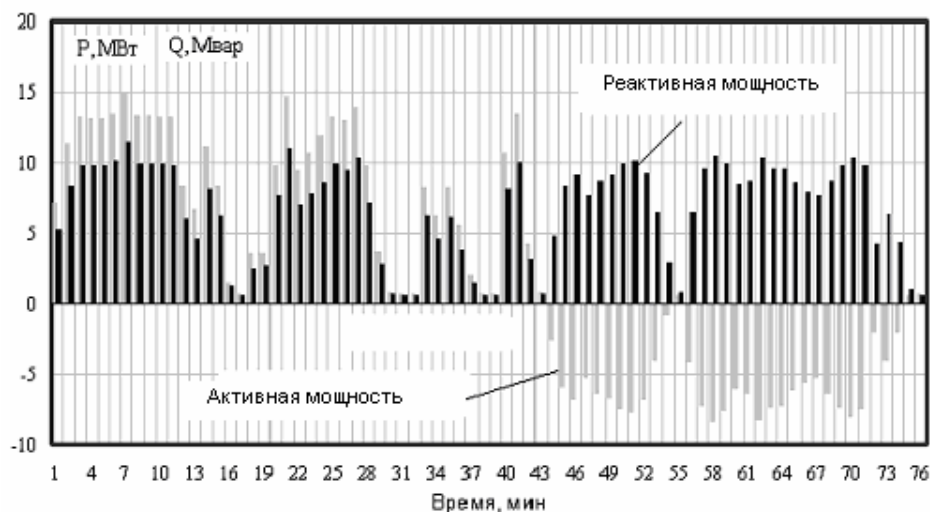


Рис. 5. График нагрузок ЭПС

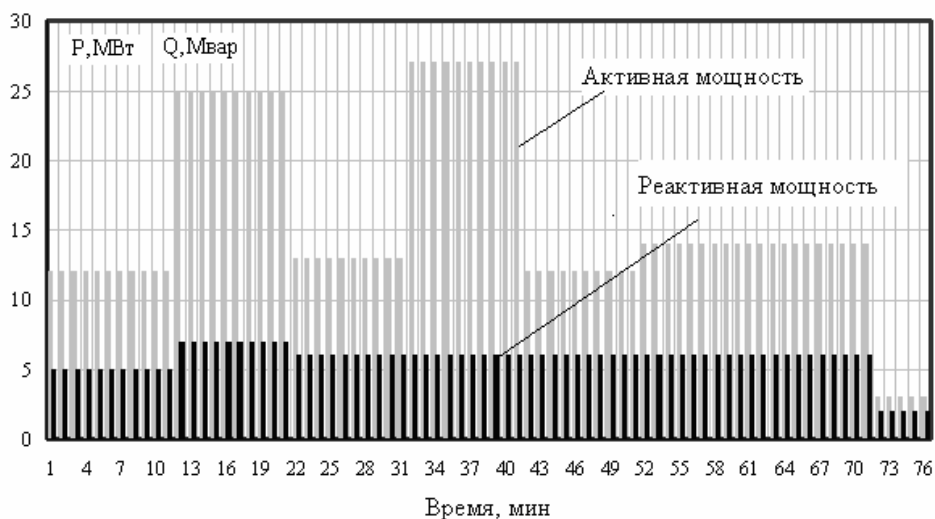


Рис. 6. График нагрузок ТП6

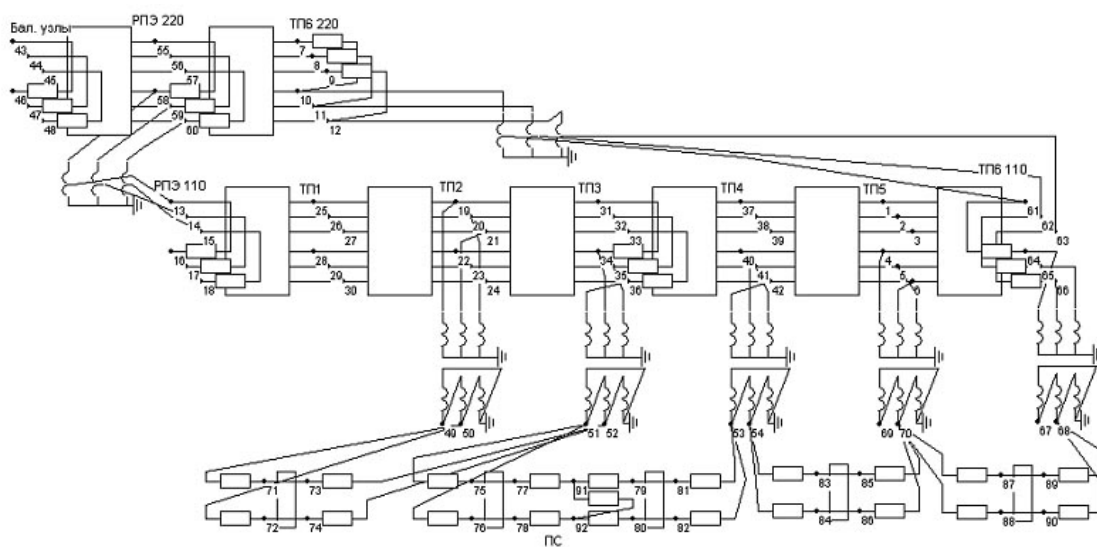


Рис. 7. Расчетная схема ОСЭ



Имитационное моделирование осуществлялось для двух вариантов:

- при неизменных нагрузках ТП6;
- при нагрузках ТП6, изменяющихся в соответствии с графиком, представленным на рис. 6.

Результаты моделирования представлены на графиках изменения напряжения на токоприемнике (рис. 8). Из анализа этого графика, а также графика погрешностей моделирования, вызванных неучетом динамики изменения нетяговых нагрузок ТП6, можно сделать вывод о том, что для корректного моделирования СТЭ необходим учет изменения нагрузок нетяговых и нетранспортных потребителей. Такой учет особенно актуален при подключении тяговых подстанций к узловым точкам ЭЭС с мощностями короткого замыкания, меньшими 700 МВ·А.

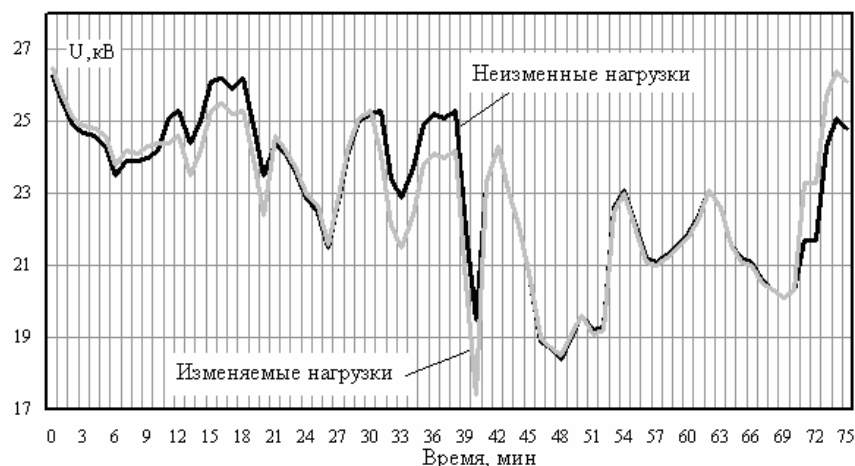


Рис. 8. Напряжение на токоприемнике ЭПС

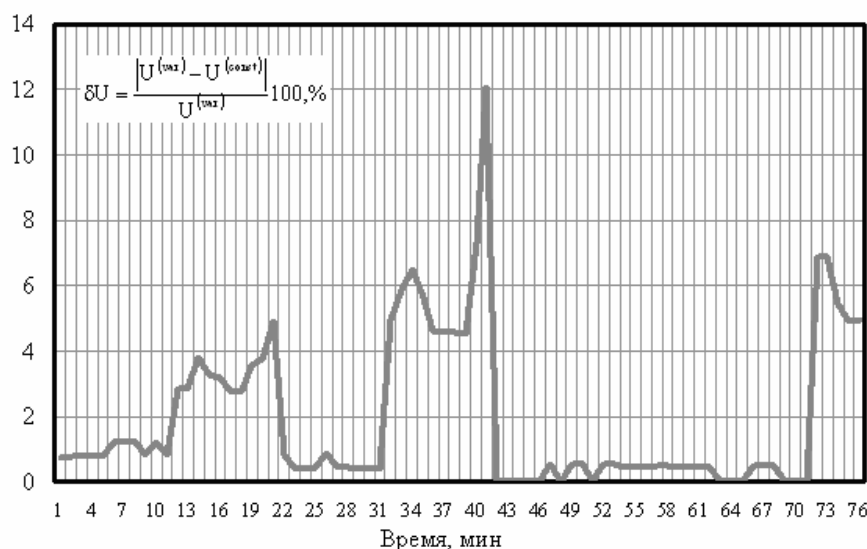


Рис. 9. Погрешности расчета уровня напряжения на токоприемнике поезда, вызванные неучетом динамики изменения нетяговых нагрузок

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

1. Представлена математическая формулировка задачи имитационного моделирования систем тягового электропитания железных дорог переменного тока с учетом влияния режимов питающей ЭЭС и районов электроснабжения нетяговых потребителей.

2. На основе расчетов, выполненных применительно к схеме реальной ОСЭ, показано, что для корректного моделирования СТЭ необходим учет изменения нагрузок нетяговых и нетранспортных потребителей. Такой учет особенно актуален при подключении тяговых подстанций к узловым точкам ЭЭС с мощностями короткого замыкания, меньшими 700 МВ·А.

Библиографический список

1. Марский В.Е. Особенности расчета системы тягового электроснабжения 2х25 кВ / В.Е. Марский // Вестник ВНИИЖТ. – 1983. – № 1. – С. 19-23.
2. Тер - Оганов, Э.В. Имитационная модель работы системы электроснабжения двухпутного электрифицированного участка [/



Э.В. Тер - Оганов // Сб. научн. тр. ВЗИИТ. – 1983. - Вып. 788.

3. Герман Л.А. Схема замещения электрифицированного участка железной дороги переменного тока / Л.А.Герман // Электричество. – 1988. – № 3. – С. 71-75.

4. Дынькин Б.Е. Алгоритм и программа имитационного моделирования системы тягового электроснабжения на ЭВМ / Б.Е.Дынькин, Л.Н.Рачек, С.Ю.Поступаев // Вопросы повышения эффективности устройств тягового электроснабжения в условиях Дальнего Востока и БАМ. – 1989. – С. 10-16.

5. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П.Закарюкин, А.В.Крюков. - Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. – 273 с.

6. Закарюкин В.П. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения / В.П.Закарюкин, А.В.Крюков. – Иркутск: ИргУПС, 2007. – 124 с.

7. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К.Г.Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

8. «Fazopord – Расчеты режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения в фазных координатах». Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2005611179 (РФ) / В.П.Закарюкин, А.В.Крюков, Е.Ю.Литвинов. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – Зарегистр. 19.05.2005.

9. Закарюкин В.П. Моделирование режимов энергосистем с электротяговыми нагрузками / В.П.Закарюкин, А.В.Крюков, С.М. Асташин // Энергетика в современном мире. – Чита, 2006. – С. 115-121.

Г.Н.Ворфоломеев, С.А.Евдокимов, В.В.Бирюков, В.Г.Шальнев

Многопульсные выпрямители: векторный метод анализа с применением полярных координат

Подключение к трёхфазным источникам переменного напряжения мощных потребителей постоянного тока приводит к возникновению проблем, связанных с обеспечением качества электрической энергии.

Выпрямительные устройства, являясь нелинейными элементами, искажающими форму кривых сетевых токов, сами подвержены влиянию несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов источников питания. Несимметрия и несинусоидальность питающих напряжений оказывает существенное влияние на электромагнитные процессы в устройствах преобразования, ухудшая их основные характеристики.

Вместе с тем, наряду с перечисленными выше внешними искажающими факторами, на качественные характеристики выпрямителей значительное влияние оказывают внутренние факторы, связанные, в частности, с конструктивной особенностью построения схем преобразования. Так, изготовление выпрямителей промышленной частоты с количеством пульсаций более шести практически неосуществимо из-за невозможности соблюдения расчетного математического соотношения между количеством витков разных частей вентильных обмоток. Нарушение же этого соотношения приводит к конструктивной несимметрии вентильных обмоток и, как следствие, к амплитудно-временным искажениям формы выпрямленного напряжения. В общем случае, для 12-пульсных схем выпрямления несимметрия оценивается отношениями линейных напряжений, формируемых частями вентильных обмоток (звезда, треугольник):

$$\alpha_K = 1 - \frac{U_Y}{U_{\Delta}} \quad \text{или} \quad K = \frac{U_Y}{U_{\Delta}}, \quad (1)$$

где α_K – коэффициент конструктивной несимметрии; K – конструктивная несимметрия.

С целью совершенствования методики исследований электромагнитных процессов авторы используют векторные построения, совмещенные с развернутыми относительно топологического центра графиками результирующих напряжений в полярных координатах. В этом случае функции, определяющие векторные построения, задаются параметрически. Сущностью метода иллюстрируется на примере оценки влияния конструктивной несимметрии вентильных обмоток трансформатора на форму выпрямленного напряжения и величину его постоянной составляющей при 12-пульсном выпрямлении с последовательным соединением выпрямительных мостов.

На рис. 1 приведены диаграммы, в которых каждый вектор описывает результирующую синусоидальную функцию, состоящую из суммы синусоидальных функций фазных напряжений вентильных обмоток. При совмещении векторной диаграммы с полярной графикой параметрического описания синусоидальных функций можно получить все определяющие аргументы, необходимые при исследовании выпрямителей.