

В. П. ЗАКАРЮКИН, А. В. КРЮКОВ, ЛЕ КОНГ ЗАНЬ (ИРГУПС)

Кафедра электроснабжения железнодорожного транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия, 664074, тел/факс (3952) 638345, эл. почта: and_kryukov@mail.ru

УЧЕТ СТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗОК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Введение

В электрических сетях напряжением 6 – 10 – 35 кВ могут иметь место сложносимметричные режимы, возникающие из-за наличия большого числа однофазных электроприемников, неравномерно распределенных по фазам [1–3]. В наибольшей степени такие режимы проявляются в сетях, питающихся от районных обмоток тяговых трансформаторов железных дорог переменного тока. Методика корректного анализа сложносимметричных режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), основанная на использовании фазных координат и решетчатых схем замещения, предложена в работах ИрГУПС [4, 5]. В этих работах приведены адекватные модели основных элементов ЭЭС: линий электропередачи, трансформаторов и узлов нагрузки.

Следует отметить особую актуальность учета узлов нагрузки при расчете несимметричных режимов. Прежде всего это касается асинхронной нагрузки (АН), так как асинхронные электродвигатели (АЭД) могут создавать симметрирующий эффект из-за неравенства сопротивлений прямой и обратной последовательностей. Несмотря на наличие работ, посвященных вопросам учета нагрузки при расчетах нормальных [6] и аварийных [7, 8] режимов электрических сетей, вопрос количественной оценки симметрирующего эффекта асинхронной нагрузки практически не рассмотрен.

Постановка задачи

Задача учета АН при расчете показателей, характеризующих несимметрию, особенно важна при расчетах режимов ЭЭС, питающих тяговые подстанции (ТП) железных дорог переменного тока. В сетях, примыкающих к ТП, имеет место значительная несимметрия [3–5], для устранения которой необходимо использовать дорогостоящие симметрирующие устройства. Стоимость этих устройств определяется уровнями несимметрии, которые на этапе проектирования находятся расчетным путем. Без

учета симметрирующего эффекта асинхронной нагрузки этот уровень будет завышенным, что приведет, в свою очередь, к повышенным затратам на устранение несимметрии.

В настоящей статье приведены результаты исследований, направленных на решение вопроса выбора корректных моделей узлов нагрузки.

Методика моделирования узлов нагрузки в фазных координатах

Для моделирования узлов нагрузки в фазных координатах могут использоваться следующие модели [4, 5]:

- неизменные отборы мощности $P+jQ$, включенные между фазным проводом и землей (рис. 1а);
- низменные отборы мощности, включенные между фазными проводами (нагрузочные ветви), рис. 1б;
- нагрузки, заданные статическими характеристиками по напряжению $P(U)+jQ(U)$, рис. 1в;
- источники тока $I' + jI''$, рис. 1г;
- шунты, подключенные между фазным проводом и землей $g + jb$, рис. 1д;
- комплексные сопротивления, подключенные между фазными проводами $g + jb$, рис. 1е;
- эквивалентный асинхронный двигатель (АЭД), моделируемый источниками тока [4, 5], рис. 1ж.

Модели в виде неизменных отборов мощности могут использоваться в узлах, имеющих средства регулирования напряжения, например, устройства *FACTS*. Модели, реализованные как шунты или сопротивления, можно применять для моделирования коммунально-бытовой нагрузки. Корректный учет изменений напряжения при расчете симметричных режимов осуществляется на основе моделей, использующих статические характеристики по напряжению.

© Закарюкин В.П. и др., 2013

Однако при наличии преобладающей асинхронной нагрузки и необходимости определения несимметричного режима требуется более сложные модели в виде эквивалентного асинхронного электродвигателя [4, 5].

Особенности моделирования асинхронной нагрузки

По сравнению со статическими элементами асинхронный двигатель (АЭД) является более сложным объектом. Несимметрия отвечающей

ему матрицы сопротивлений приводит к невозможности прямого моделирования решетчатой схемой с RLC -элементами. Сложности связаны с наличием двух вращающихся магнитных полей (в прямом и в обратном направлениях). При несимметрии питающих напряжений в асинхронном двигателе протекают синусоидальные процессы на трех частотах: на 50 Гц, на частоте около 100 Гц и на частоте скольжения.

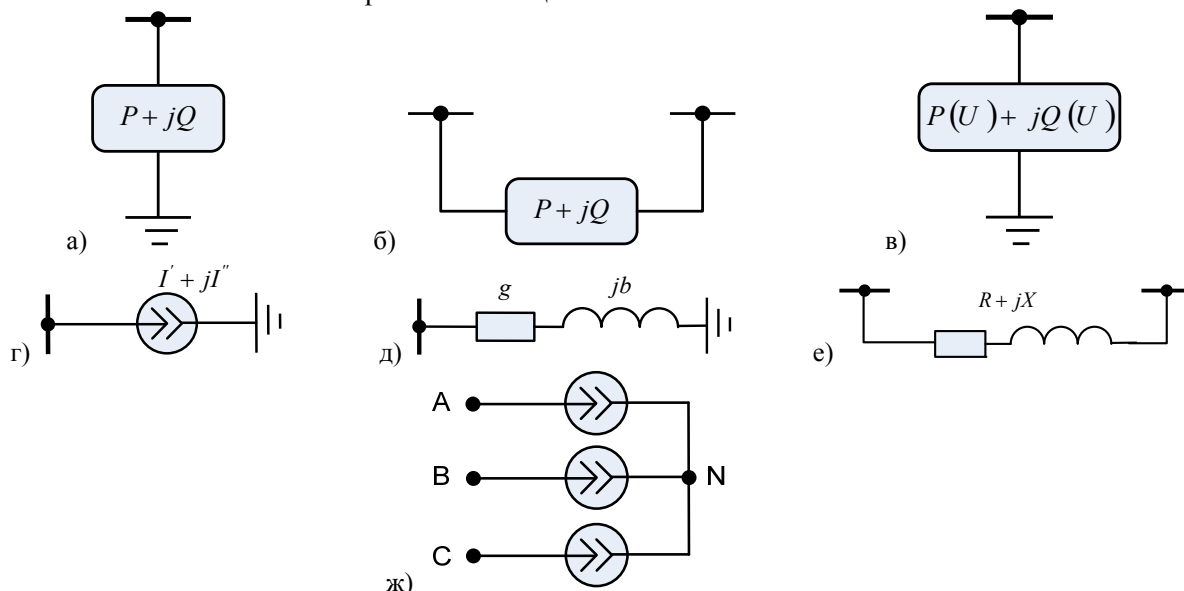


Рис. 1. Модели узлов нагрузки в фазных координатах

Достаточно хорошо изучено поведение асинхронного двигателя при симметричном трехфазном напряжении, когда он может быть представлен однолинейной схемой замещения. Параметры схем замещения АЭД зависят от режима его работы: пуск или работа с малыми скольжениями. Кроме того, существует несколько вариантов схем замещения. С точки зрения расчетов режима в фазных координатах, когда нужно учитывать параметры двигателя при малых скольжениях и при скольжении, близком к 2 (режим электромагнитного тормоза), целесообразно сделать следующие допущения.

Во-первых, удобно воспользоваться схемой замещения асинхронного двигателя с выносом намагничивающей цепи на первичные зажимы по рис. 2а. При этом предполагается, что при пуске и при скольжении порядка 2 схема замещения выглядит одинаково, но имеет разные параметры цепи ротора, рис. 2б. На рис. 2 показаны элементы ветви намагничивания R_{μ} , X_{μ} , сопротивления статора R_1 , X_1 , эквивалентные сопротивления ротора R_2/s , X_2 , учитывающие потери в роторе и механическую нагрузку на валу, эквивалентную рассеянию энергии в эле-

менте сопротивлением $R_2(1-s)/s$, а также соответствующие пусковые параметры R_{2p}/s , X_{2p} ; s – скольжение ротора.

Во-вторых, предполагается, что в режимах пуска и электромагнитного тормоза (для обратной последовательности напряжений) квадрат реактивного сопротивления много больше квадрата активного сопротивления.

В-третьих, определение параметров элементов схем рис. 2 производится на основе номинальных значений КПД η , тока Г-образной части схемы замещения $I_{гн}$ и $\cos \varphi_{гн}$.

В-четвертых, по значениям напряжений прямой и обратной последовательностей и заданной механической мощности двигателя определяются токи прямой и обратной последовательностей, и двигатель в расчетной схеме моделируется источниками тока, соединенными звездой (рис. 1ж). Значения токов источников корректируются на каждом шаге итерационного процесса.

Нейтраль двигателя считается изолированной и токи нулевой последовательности в цепях двигателя не возникают.

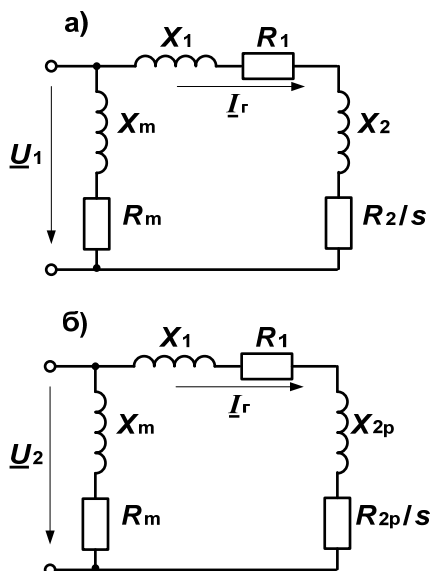


Рис. 2. Схемы замещения в симметричных составляющих

Предполагается, что расчеты установившихся режимов ЭЭС с асинхронной нагрузкой производятся в двух вариантах. Первый вариант предполагает расчет начала переходного процесса при достаточно быстром изменении напряжений на двигателе, когда развиваемая двигателем механическая мощность и скорость вращения вала еще не успели измениться из-за сравнительно большой механической инерции. Частота вращения вала двигателя при этом определяется заданным начальным приближением напряжений в узлах двигателя. Исходными данными при этом являются начальные приближения напряжений $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ в узлах двигателя и механическая мощность на валу двигателя, соответствующая этим напряжениям.

Второй вариант расчета предполагает расчет режима работы двигателя по окончании переходного процесса установления новых значений частоты вращения, момента и механической мощности двигателя в соответствии с его статической характеристикой.

В начале расчета режима по формулам, приведенным в работах [4, 5], вычисляются параметры схем замещения по рис. 2.

На каждом шаге итерационного процесса производится расчет токов источников. При этом токи прямой последовательности определяются на основе схемы рис. 2а, а токи обратной – на базе схемы рис. 2б. Алгоритм расчета включает следующие этапы.

1. По начальным приближениям напряжений $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ в узлах двигателя определяются

напряжения прямой и обратной последовательностей

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \underline{a}\dot{U}_b + \underline{a}^2\dot{U}_c) = U_1' + jU_1'' ,$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \underline{a}^2\dot{U}_b + \underline{a}\dot{U}_c) = U_2' + jU_2'' ,$$

$$\underline{a} = e^{j120^\circ} .$$

Напряжение нейтрали учитывать нет необходимости, поскольку добавление (или вычитание) одинаковых напряжений из трех фазных влияет только на напряжение нулевой последовательности, которое не создает токов из-за изолирования нейтрали.

2. Рассчитывается рабочее скольжение двигателя, определяемое начальными приближениями напряжений.

3. С учетом фаз напряжений \dot{U}_1, \dot{U}_2 рассчитывается ток прямой последовательности для схемы рис. 2а при скольжении s

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{\mu 1} + \dot{I}_{\Gamma 1}$$

и ток обратной последовательности для схемы рис. 2б при скольжении $(2-s)$:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{\mu 2} + \dot{I}_{\Gamma 2} .$$

При этом

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\mu 1} &= \frac{\dot{U}_1}{R_\mu + jX_\mu} = I_{\mu 1}' + jI_{\mu 1}'' = \\ &= \frac{U_1'R_\mu + U_1''X_\mu}{R_\mu^2 + X_\mu^2} + j \frac{U_1''R_\mu - U_1'X_\mu}{R_\mu^2 + X_\mu^2} ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Gamma 1} &= \frac{\dot{U}_1}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) + jX_\kappa} = I_{\Gamma 1}' + jI_{\Gamma 1}'' = \\ &= \frac{U_1'\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) + U_1''X_\kappa}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_\kappa^2} + j \frac{U_1''\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right) - U_1'X_\kappa}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + X_\kappa^2} ; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{\mu 2} = \frac{U_2'R_\mu + U_2''X_\mu}{R_\mu^2 + X_\mu^2} + j \frac{U_2''R_\mu - U_2'X_\mu}{R_\mu^2 + X_\mu^2} ;$$

$$\dot{I}_{\Gamma 2} = \frac{U_2'\left(R_1 + \frac{R_{2p}}{2-s}\right) + U_2''X_{kp}}{\left(R_1 + \frac{R_{2p}}{2-s}\right)^2 + X_{kp}^2} +$$

$$+ j \frac{U_2''\left(R_1 + \frac{R_{2p}}{2-s}\right) - U_2'X_{kp}}{\left(R_1 + \frac{R_{2p}}{2-s}\right)^2 + X_{kp}^2} .$$

4. По симметричным составляющим определяются токи трех источников тока, замещающих двигатель:

$$\underline{J}_a = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \quad \underline{J}_b = \underline{a}^2 \underline{I}_1 + \underline{a} \underline{I}_2;$$

$$\underline{J}_c = \underline{a} \underline{I}_1 + \underline{a}^2 \underline{I}_2.$$

5. На основе полученных токов источников производится расчет очередного приближения напряжений в узлах сети. При невыполнении условия окончания итерации производится пересчет напряжений прямой и обратной последовательностей и в первом варианте производится переход на пункт 3. Во втором варианте расчета перед переходом на пункт 3 по текущим значениям напряжений прямой и обратной последовательностей пересчитывается скольжение двигателя.

Расчеты потерь в двигателе производятся по окончании итерационного процесса путем вычисления потоков мощности в узлы двигателя с вычитанием механической мощности:

$$\Delta P = \operatorname{Re}(\dot{U}_a \tilde{J}_a + \dot{U}_b \tilde{J}_b + \dot{U}_c \tilde{J}_c) - P_m,$$

$$\Delta Q = \operatorname{Im}(\dot{U}_a \tilde{J}_a + \dot{U}_b \tilde{J}_b + \dot{U}_c \tilde{J}_c).$$

Величины ΔP , ΔQ определяются как потерями на нагрев двигателя, так и генерацией, которая может возникать в начале переходного электромеханического процесса. Прямые тепловые потери определяются потерями на резистивных элементах схем замещения прямой и обратной последовательностей.

Результаты моделирования и их обсуждение

Моделирование осуществлялось применительно к схеме ЭЭС, питающей тяговые подстанции железной дороги переменного тока,

при движении поездов по графику, отображенному на рис.3.

Схема электроэнергетической системы показана на рис. 4. Для моделирования использовалась расчетная схема программного комплекса Fazonord [5], представленная на рис. 5. Несимметричные режимы в сети создавались тяговыми нагрузками поездов, передвигающихся по горно-перевальному участку железной дороги.

При моделировании реализованы следующие модели узлов нагрузки:

- подключение к шинам районных обмоток тяговых подстанций, обозначенных на рис. 4 как «Левая ТП» и «Правая ТП», асинхронной нагрузки $1.7+j0.96$ МВ·А на фазу;
- отсутствие районной нагрузки (холостой ход районной обмотки трансформатора);
- нагрузка в форме постоянной мощности $1.7+j0.96$ МВ·А на фазу;
- нагрузка в виде эквивалентного шунта проводимостью $0.017+j0.00963$ См на фазу, подключенного через разделительный трансформатор.

Результаты моделирования представлены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 6–8.

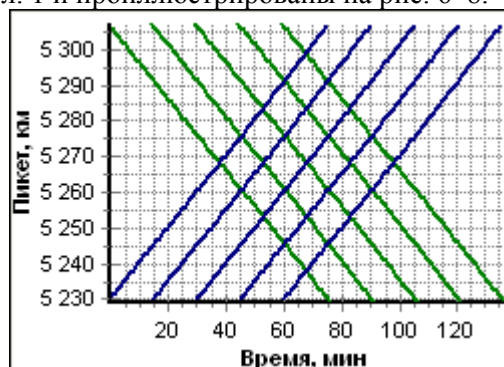


Рис. 3. График движения поездов

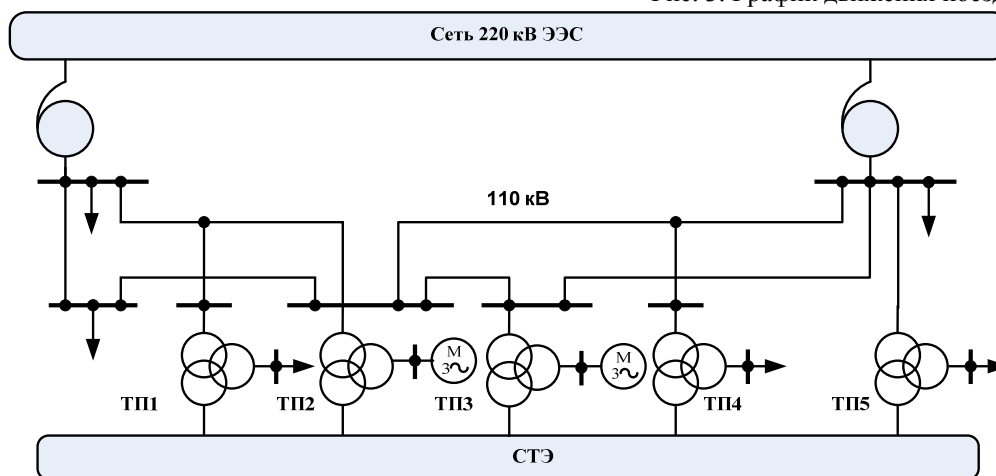


Рис. 4. Схема тягового и внешнего электроснабжения: СТЭ – система тягового электроснабжения

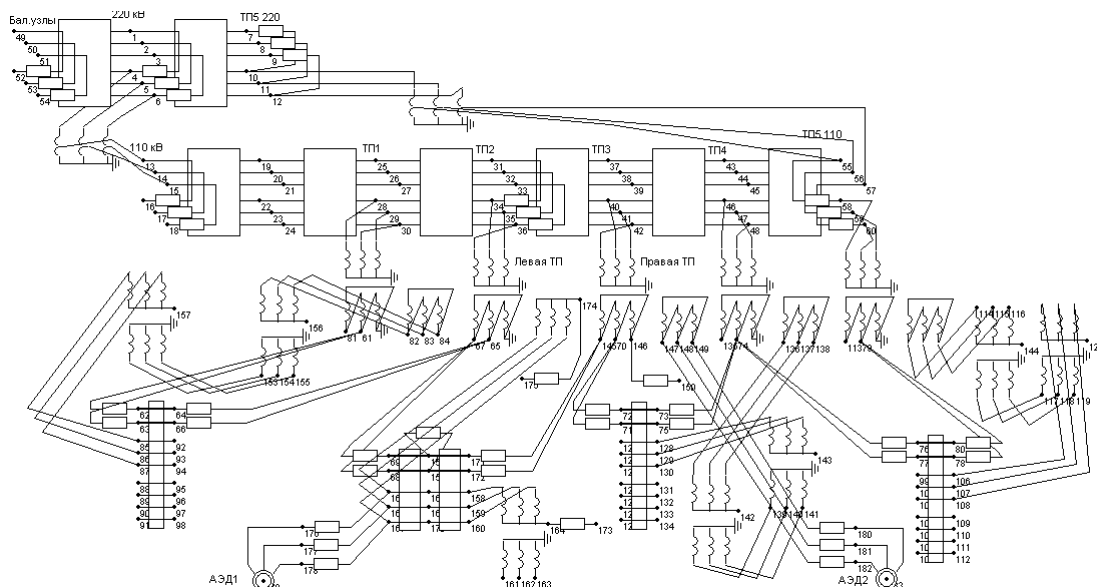


Рис. 5. Расчетная схема с моделями АЭД

Таблица 1

Средние и максимальные значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности, %

Параметр	Левая ТП				Правая ТП			
	Модель нагрузки				Модель нагрузки			
	АЭД	Нет нагрузки	Отборы мощности	Шунты	АЭД	Нет нагрузки	Отборы мощности	Шунты
Среднее значение	1.9	2.6	2.5	2.5	3.3	4.4	4.2	4.1
Максимум	5.5	7.1	7.3	7.1	8.2	10.7	10.8	10.5

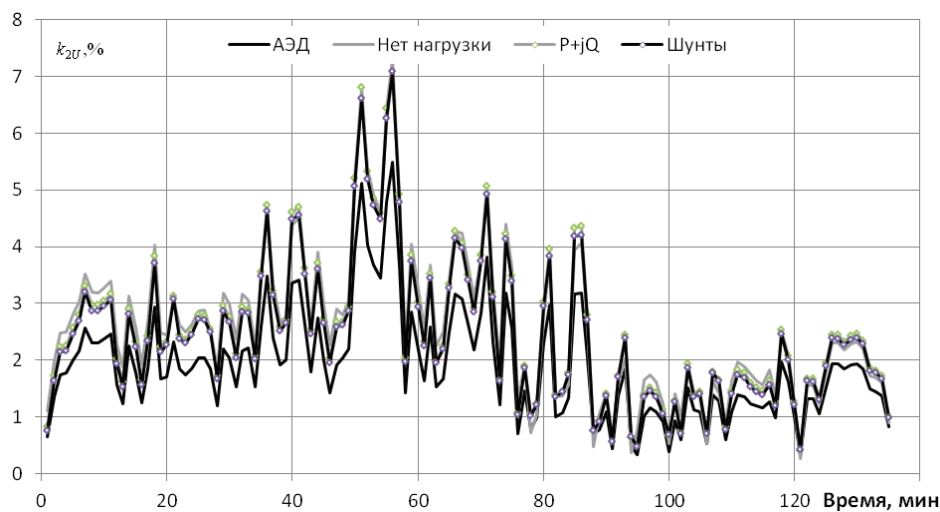


Рис. 6. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности k_{2U} левой ТП

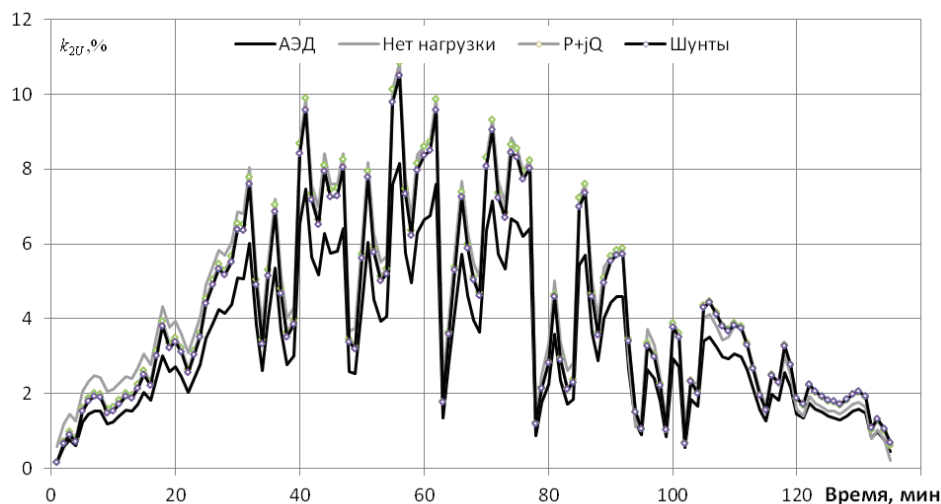


Рис. 7. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности k_{2U} правой ТП

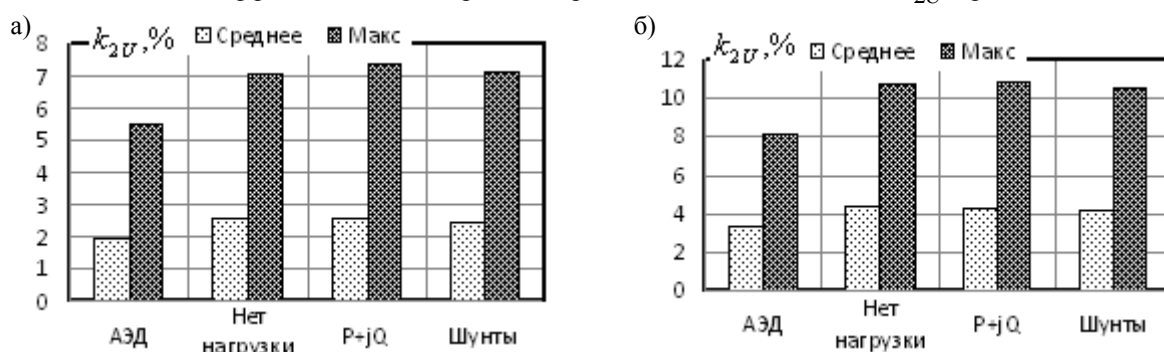


Рис. 8. Средние и максимальные значения k_{2U} : а) левая ТП; б) правая ТП

Полученные результаты показывают, что неучет нагрузки при моделировании несимметричных режимов может приводить к завышению максимальных значений коэффициента несимметрии k_{2U} до 30% и более.

Выводы

Анализ различных моделей узлов нагрузки, применяемых при расчете режимов электроэнергетических систем в фазных координатах, показал, что при наличии мощных узлов промышленной нагрузки следует использовать мо-

дели в виде эквивалентных асинхронных электродвигателей. Использование упрощенных моделей в виде отборов мощности или шунтов может привести к существенному завышению уровней несимметрии из-за неучета симметрирующего эффекта асинхронной нагрузки. Завышение уровня несимметрии в проектных расчетах может привести, в свою очередь, к повышенным затратам, связанным с применением дорогостоящих средств по симметрированию режимов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маркушевич Н.С. Качество напряжения в городских электрических сетях / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. – М.: Энергия, 1975. – 256 с.
2. Левин М.С. Качество электроэнергии в сетях сельских районов / М. С. Левин, А. Е. Мурадян, Н. Н. Сырых – М.: Энергия, 1975. – 224 с.
3. Тимофеев Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
4. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск: Иркут. ун-т. 2005. – 273 с.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешне-

REFERENCES

1. Markushevich N. S., Soldatkina L.A. Kachestvo napryazhenia v gorodskih elektricheskikh setyah [Energy quality of city electric networks]. M: Energy, 1975. 256 pages.
2. Levin M. S., Muradyan A.E. Starshinov N.N. Kachestvo elektroenergii v setyah selskih rayonov [Electric power quality of country networks]. M: Energy, 1975. 224 pages.
3. Timofeev D. V. Regimi v elektricheskikh systemah s tyagovimi nagruzkami [Regimes of electric systems with traction loadings]. M: Energy, 1972. 296 pages.
4. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonesimmetrichnye regimi elektricheskikh system [Complex asymmetrical regimes of electric systems]. Irkutsk: 2005. 273 pages.

го електроснабження залізних доріг переменного току / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск: ИРГУПС, 2011. – 170 с.

6. Гуревич Ю.Е. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, Э. А. Хачатрян. – М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.

7. Крючков И.П. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования / И. П. Крючков, Б. Н. Неклепаев, В. А. Старшинов и др. – М.: Академия, 2005. – 416 с.

8. Жуков В.В. Эквивалентное сопротивление обратной последовательности узлов комплексной нагрузки [Текст] / В. В. Жуков, Б. Н. Неклепаев // Электричество. – 1975. – № 10. – С. 57–60.

9. Крюков А.В. Учет асинхронной нагрузки при моделировании систем тягового электроснабжения железных дорог [Текст] / А. В. Крюков, Ле Конг Зань // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3(35). – С. 116–122.

5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Metodi sovместnogo modelirovaniya system tyagovogo i vneshnego elektrosnabgenia zheleznih dorog peremennogo toka [Joint modeling of traction and external power supply systems of alternating current railroads]. Irkutsk: 2011. 170 pages.

6. Gurevich YU.E. Libova L.E. Hachatryan E.A. Ustoichvost nagruzki elektricheskikh system [Load's stability of electric systems]. M: Energoizdat, 1981. 208 pages.

7. Kryuchkov, Neklepayev B. N., Starshinov V.A. etc. Raschet korotkih zamikaniy i vibor elektrooborudovaniya [Short circuit calculation and electric equipment choice]. M: Academy, 2005. 416 pages.

8. Zhukov V. V., Neklepayev B. N. Ekvivalentnoe soprotivlenie obratnoi posledovatel'nosti uzlov kompleksnoi nagruzki [Equivalent zero sequence resistance of complex load nodes] // Electricity. No. 10. 1975. Page 57-60.

9. Kryukov A.V., Danh Le Cong. Uchet asinhronnoi nagruzki pri modelirovanii system tyagovogo elektrosnabgenia zheleznih dorog [Asynchronous load accounting in modeling of traction power supply system] // Modern technologies. System analysis. Modeling. No. 3(35). 2012. Page 116-122.

Поступила в печать 10.04.2013.

Ключевые слова: режимы систем тягового электроснабжения, асинхронная нагрузка.

Статья рекомендована к печати д.т.н., с.н.с., В. Г. Сыченком

Задача учета асинхронной нагрузки при расчете показателей, характеризующих несимметрию, особенно важна при расчетах режимов электроэнергетических систем, питающих тяговые подстанции железных дорог переменного тока. В сетях, примыкающих к тяговым подстанциям, может иметь место значительная несимметрия, для устранения которой необходимо использовать дорогостоящие симметрирующие устройства. Стоимость этих устройств определяется уровнями несимметрии, которые на этапе проектирования находятся расчетным путем. Без учета симметрирующего эффекта асинхронной нагрузки этот уровень будет завышенным, что приведет, в свою очередь, к завышенным затратам на устранение несимметрии.

По сравнению со статическими элементами асинхронный двигатель представляет собою более сложный для моделирования объект. Сложности связаны с наличием двух вращающихся в прямом и в обратном направлениях магнитных полей. При несимметрии питающих напряжений в асинхронном двигателе протекают синусоидальные процессы на трех частотах: на частоте 50 Гц, частоте скольжения и на частоте порядка 100 Гц.

Возможны два варианта алгоритмов расчета установившихся режимов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой. Первый предполагает расчет начала переходного процесса при достаточно быстром изменении напряжений на двигателе, когда развиваемая электродвигателем механическая мощность и скорость вращения вала еще не успели измениться из-за сравнительно большой механической инерции. Частота вращения вала двигателя при этом определяется заданным начальным приближением напряжений в узлах двигателя. Исходными данными при этом являются начальные приближения напряжений в узлах двигателя и механическая мощность на валу двигателя, соответствующая этим напряжениям. Второй вариант предполагает расчет режима работы двигателя по окончании переходного процесса установления новых значений частоты вращения, момента и механической мощности двигателя в соответствии с его статической характеристикой. Расчетная модель асинхронного двигателя представляет собой три источника тока, соединенные звездой с изолированной нейтралью.

Представленные результаты моделирования режимов системы электроснабжения горно-перевального участка одной из железных дорог Восточной Сибири показали, что учет асинхронной нагрузки при моделировании несимметричных режимов может приводить к завышению максимальных значений коэффициента несимметрии по обратной последовательности до 30% и более.

УДК 621.331

В.П. ЗАКАРЮКИН, А.В. КРЮКОВ, ЛЕ КОНГ ЗАНЬ (ИрДУШС)

Кафедра электропостачання залізничного транспорту, Іркутський державний університет шляхів сполучення, вул. Чернишевського, 15, Іркутськ, Росія, 664074, тел/факс (3952) 638345, ел. пошта: and_kryukov@mail.ru

ВРАХУВАННЯ СТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

Завдання врахування асинхронного навантаження при розрахунку показників, що визначають несиметрію, особливо важлива при розрахунках режимів електроенергетичних систем (ЕЕС), що живлять тягові

© Закарюкин В.П. и др., 2013

підстанції(ТП) залізниць змінного струму. У мережах, що примикають до ТП, може мати місце значна несиметрія, для усунення якої необхідно використати дорогі симетрируючі пристрої. Вартість цих пристроїв визначається рівнями несиметрії, які на етапі проектування знаходяться розрахунковим шляхом. Без урахування симетрируючого ефекту асинхронного навантаження цей рівень буде завищеним, що приведе, у свою чергу, до невиправданих витрат на усунення несиметрії.

В порівнянні із статичними елементами асинхронний двигун(АЕД) представляє собою складніший об'єкт. Несиметрія матриці опорів у фазних координатах призводить до неможливості прямого моделювання гратчастою схемою з RLC- елементами. Складнощі пов'язані з наявністю двох магнітних полів(у прямому і в зворотному напрямках), що обертаються. При несиметрії живлячої напруги в асинхронному двигуні протікають синусоїдальні процеси на трьох частотах: 50 Гц, близько 100 Гц і частоті ковзання.

Запропоновано два варіанти алгоритмів розрахунку усталених режимів ЕЕС при асинхронному навантаженні. Перший припускає розрахунок початку перехідного процесу при досить швидкій зміні напруги на двигуні, коли механічна потужність, яку розвиває АЕД, і швидкість обертання валу ще не встигли змінитися завдяки порівняно великій механічній інерції. Частота обертання валу двигуна при цьому визначається заданим початковим наближенням напруги у вузлах двигуна.

Початковими даними при цьому є початкові наближення напруги у вузлах двигуна і механічна потужність на валу двигуна, що відповідає цій напрузі. Другий варіант припускає розрахунок режиму роботи двигуна після закінчення перехідного процесу встановлення нових значень частоти обертання, моменту і механічної потужності двигуна відповідно до його статичної характеристики. Розрахункова модель асинхронного двигуна складається з трьох джерел струму, сполучених зіркою з ізольованою нейтраллю.

Представлені результати моделювання режимів системи електропостачання гірничо-перевальної ділянки однієї із залізниць Східного Сибіру. Отримані результати показали, що неврахування навантаження при моделюванні несиметричних режимів може призводити до завищення максимальних значень коефіцієнта несиметрії по зворотній послідовності до 30 більше.

Ключові слова: режими систем тягового електропостачання, асинхронне навантаження.

Статтю рекомендовано до друку д.т.н, с.н.с., *В. Г. Сиченком*

UDC 621.331

V.P. ZAKARYUKIN, A.V. KRYUKOV, DANH LE CONG (IrSUTC)

Department of railway transport power supply, Irkutsk State University of Transport Communications, Chernyshevskaya St., 15, Irkutsk, Russia, 664074, phone/fax (3952) 638345, email: and_kryukov@mail.ru

STATIONARY LOAD ACCOUNTING IN MODELLING OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM OF ALTERNATING CURRENT RAILROAD

Asynchronous load accounting in calculation of asymmetry factor is especially important at calculations of the electrical power systems feeding the traction substations of alternating current railroads. In the adjoining networks considerable asymmetry can take place, for which elimination it is necessary to use expensive symmetrizing devices. The cost of these devices is defined by asymmetry levels which at a stage of design are defined by calculations. Without accounting of asynchronous load's symmetrizing effect this levels will be overestimated, that will lead to overpriced cost of asymmetry elimination.

Asynchronous engine is more difficult object for modeling than static element. Difficulties are connected with existence of two rotating magnetic fields (in direct and in backhanded directions). At asymmetry of the feeding voltages in the asynchronous engine sinusoidal processes at three frequencies proceed: at a frequency of 50 Hz, frequency of sliding and at a frequency about 100 Hz.

It may be two variants of calculating algorithm for electric system with asynchronous load steady states. The first assumes calculation of the beginning of transient process at rather fast change of voltages, when mechanical power and speed of rotation didn't change yet because of rather big mechanical inertia. Frequency of rotation of the engine is defined by the initial approach of voltages. Therefore these basic data of voltages have to be carefully verified. Basic data are initial approximations of voltages and mechanical capacity on the engine shaft, corresponding to these voltages. The second variant assumes calculation of operating mode at the end of the engine transient process with new frequency of the rotation, with new moment and new mechanical power according to its static characteristic. The calculating model of the asynchronous engine is represented by three current sources connected by a star with the isolated neutral.

Modeling results of one of Eastern Siberia railroad power supply system showed that not accounting of asynchronous load can lead to overestimate of the maximum values of negative sequence asymmetry factor to 30% or more.

Keywords: modes of traction power supply systems, asynchronous load.

Prof. *V. G. Sichenko*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.