

* * *

Исследование пусковых режимов вспомогательных асинхронных двигателей электровозов «Ермак»

ГИРНИК А.С., РАПОПОРТ О.Л.

Разработана математическая модель, позволяющая исследовать переходные процессы при пуске трёхфазных асинхронных вспомогательных двигателей, работающих в группе от однофазной сети на борту электровоза.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, переходные процессы, математическая модель, электровоз

A mathematical model is developed that makes it possible to study the transients arising during startup of three-phase auxiliary induction motors operating in a group supplied from a single-phase network aboard an electric locomotive.

Key words: induction motor, transients, mathematical model, electric locomotive

В современных электровозах переменного тока, питающихся от однофазной сети, имеют место нарушения в работе вспомогательных асинхронных двигателей (ВЭМ), в частности пробой изоляции статора, что влечёт за собой преждевременный выход из строя электрической машины. Особенно это касается двигателей НВА-55 на электровозах 2ЭС5К, что подтверждает статистика, из которой следует, что с 2003 по 2008 г. число таких нарушений по данным [3] возросло примерно в два раза.

Возможными причинами пробоя изоляции обмоток статора могут быть сильные электрические перенапряжения, периодически возникающие при пусках ВЭМ, питающихся от однофазной сети по конденсаторной схеме, а также несимметрия фазных напряжений на зажимах двигателей. Для нескольких параллельно работающих двигателей может быть использован набор конденсаторных батарей, включаемых между двумя фазами ВЭМ. Упрощённая схема такого питания приведена на

рис. 1, где U – однофазное напряжение питания; I и II – первый и второй двигатели; A_I, B_I, C_I и A_{II}, B_{II}, C_{II} – фазы первого и второго двигателей; C_1, C_2, C_3 – конденсаторы, необходимые для симметрирования фазных питающих напряжений ВЭМ в процессе пуска и длительной работы. Подключаемые к зажимам a и b конденсаторы образуют результирующую ёмкость C_p .

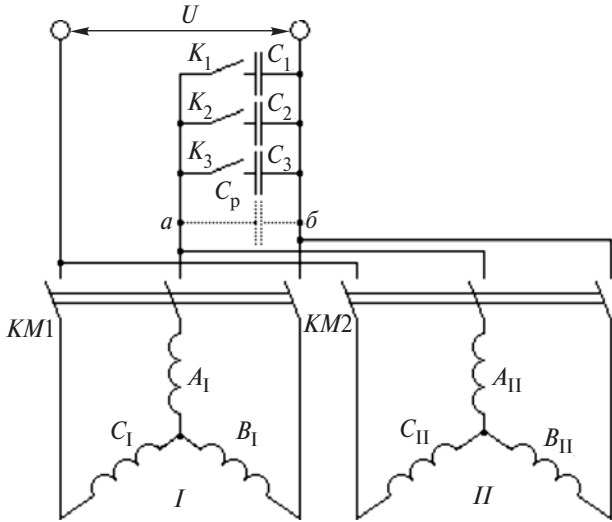


Рис. 1. Схема питания ВЭМ при их совместной работе

Следует отметить, что переходный процесс в одном из пускаемых двигателей может влиять на режим работы соседней электрической машины, работающей в установившемся режиме.

Для исследования переходных процессов ВЭМ необходима специальная математическая модель. Ранее исследовалось влияние несимметрии питания на режим работы асинхронных двигателей (АД). Методы симметричных составляющих в [1] и пространственно-временных комплексов в [2] позволяют проанализировать работу АД при несимметрии первичного напряжения только при питании от трёхфазной сети. Методика [4] позволяет реализовать метод симметричных составляющих для исследования режимов работы АД в зависимости от особенностей схемы питания, но только для одной машины. В 70-х годах исследовались режимы работы ВЭМ, таких как АЭ-92-4 [5], и принимались меры по модернизации их конструкции, однако отсутствие в то время высокопроизводительных вычислительных машин не позволяло детально исследовать режимы работы АД.

Для разработки необходимой математической модели удобно взять за основу методику [4], но для схемы рис. 1 она значительно усложнится. Поэтому необходимо сделать следующее.

Для схемы рис. 1 составим по второму закону Кирхгофа уравнения:

$$\dot{U}_{(I)} = \dot{U}_{B(I)} - \dot{U}_{C(I)}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_{(II)} = \dot{U}_{B(II)} - \dot{U}_{C(II)}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{A(I)} - \dot{I}_{C_p} \dot{Z}_{C_p} = \dot{U}_{B(I)}; \quad (3)$$

$$\dot{U}_{A(II)} - \dot{I}_{C_p} \dot{Z}_{C_p} = \dot{U}_{B(II)}, \quad (4)$$

где \dot{U}_A, \dot{U}_B и \dot{U}_C – комплексные значения фазных напряжений, \dot{U} – комплексное значение однофазного напряжения, $\dot{B}; \dot{Z}_{C_p}$ – комплексное значение сопротивления результирующей ёмкости, Ом; \dot{I}_{C_p} – комплексное значение тока результирующей ёмкости, А.

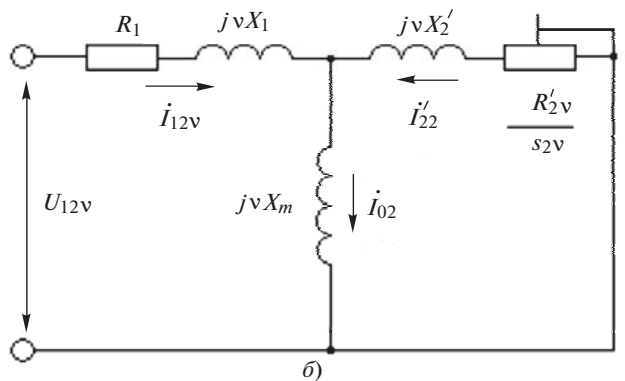
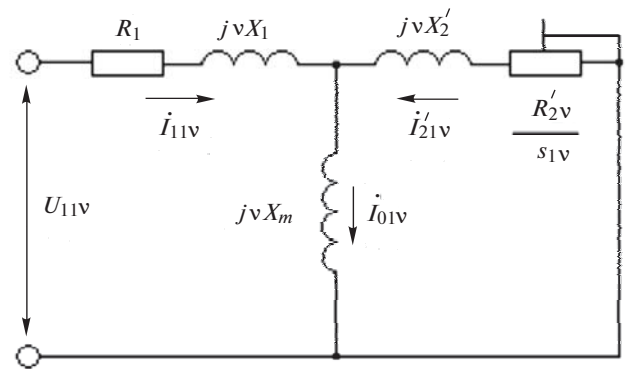


Рис. 2. Схема замещения одной фазы для напряжения прямой (а) и обратной (б) последовательности всех гармоник

По методу симметричных составляющих для каждого из двигателей с учетом рис. 1 и 2 можно записать уравнения всех гармоник:

$$\dot{I}_{An} = \dot{I}_{11n} + \dot{I}_{12n}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_{Bn} = a\dot{I}_{11n} + a^2\dot{I}_{12n}; \quad (6)$$

$$\dot{I}_{Cn} = a^2\dot{I}_{11n} + a\dot{I}_{12n}; \quad (7)$$

$$\dot{U}_{An} = \dot{U}_{11n} + \dot{U}_{12n} = \dot{I}_{11n}\dot{Z}_{11n} + \dot{I}_{12n}\dot{Z}_{12n}; \quad (8)$$

$$\dot{U}_{Bn} = a\dot{U}_{11n} + a^2\dot{U}_{12n} = a\dot{I}_{11n}\dot{Z}_{11n} + a^2\dot{I}_{12n}\dot{Z}_{12n}; \quad (9)$$

$$\dot{U}_{Cn} = a^2\dot{U}_{11n} + a\dot{U}_{12n} = a^2\dot{I}_{11n}\dot{Z}_{11n} + a\dot{I}_{12n}\dot{Z}_{12n}. \quad (10)$$

Так как уравнения справедливы для обоих двигателей, то индексы *I* и *II* опущены. В (5)–(10) используются следующие величины: *n* – номер гармоники; $a = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ – оператор поворота вектора на 120°; \dot{U}_{11n} , \dot{U}_{12n} – напряжения прямой и обратной последовательности; \dot{Z}_{11n} , \dot{Z}_{12n} – комплексные сопротивления статора прямой и обратной последовательности; \dot{Z}_{21n} , \dot{Z}_{22n} – комплексные сопротивления ротора прямой и обратной последовательности.

Таким образом, если соотношения (5) – (10) для токов и напряжений фаз подставить в (1) и (2), то можно получить уравнения для вычисления токов прямой и обратной последовательности каждой из гармоник:

$$\dot{I}_{11(I)} = \frac{Ug_2(\dot{Z}_{12(I)}\dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{12(II)}\dot{Z}_{C_p} - a\dot{Z}_{12(I)}\dot{Z}_{11(II)})}{(D_1\dot{Z}_{12(I)} + D_2\dot{Z}_{11(I)})(a - a^2)} \quad (11)$$

$$\dot{I}_{12(I)} = \frac{Ug_2(\dot{Z}_{11(I)}\dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{11(II)}\dot{Z}_{C_p} - a\dot{Z}_{11(I)}\dot{Z}_{11(II)})}{(D_2\dot{Z}_{11(I)} + D_1\dot{Z}_{12(I)})(a - a^2)} \quad (12)$$

где

$$D_1 = \dot{Z}_{C_p}\dot{Z}_{11(II)}g_2 + g_1(a - a^2)$$

$$\dot{Z}_{11(I)}\dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{C_p}\dot{Z}_{11(II)} - 2a(\dot{Z}_{11(I)}\dot{Z}_{11(II)}) - \dot{Z}_{11(I)}\dot{Z}_{C_p} + \dot{U} \quad (13)$$

$$D_2 = \dot{Z}_{C_p}\dot{Z}_{11(II)}g_2 + g_1(a - a^2)$$

$$\dot{Z}_{12(I)}\dot{Z}_{11(II)} - a^2(\dot{Z}_{12(I)}\dot{Z}_{11(II)}) - \dot{Z}_{12(I)}\dot{Z}_{C_p} + \dot{Z}_{C_p}^2 + \dot{U} \quad (14)$$

$$g_1 = \dot{Z}_{12(II)}\dot{Z}_{C_p} - 2\dot{Z}_{11(II)}\dot{Z}_{12(II)} + a\dot{Z}_{11(II)}\dot{Z}_{12(II)} +$$

$$+ \dot{Z}_{11(II)}\dot{Z}_{C_p} + a^2(\dot{Z}_{11(II)}\dot{Z}_{12(II)}); \quad (15)$$

$$g_2 = \dot{Z}_{C_p}(\dot{Z}_{11(II)} - \dot{Z}_{12(II)}) + a^2\dot{Z}_{12(II)} - a\dot{Z}_{11(II)}. \quad (16)$$

Выражения для сопротивлений:

$$\dot{Z}_{21n} = jnX_{\zeta}Kxr_{\text{хнас}21n} + \frac{R_{\zeta}Kr_{21n}}{s_{1n}}; \quad (17)$$

$$\dot{Z}_{22n} = jnX_{\zeta}Kxr_{\text{хнас}22n} + \frac{R_{\zeta}Kr_{22n}}{s_{2n}}; \quad (18)$$

$$\dot{Z}_{11n} = R_1 + jnX_1Kxs_{\text{нас}1n} + [\dot{Z}_{0n}^{-1} + \dot{Z}_{21n}^{-1}]^{-1}; \quad (19)$$

$$\dot{Z}_{12n} = R_1 + jnKxs_{\text{нас}2n} + [\dot{Z}_{0n}^{-1} + \dot{Z}_{22n}^{-1}]^{-1}; \quad (20)$$

$$\dot{Z}_{0n} = jnX_m, \quad (21)$$

где s_{1n} , s_{2n} – скольжение для поля прямой и обратной последовательности гармоники n отн. ед.; R_1 – активное сопротивление фазы статора, Ом; R_{ζ} – активное приведённое сопротивление фазы ротора, Ом; X_1 – индуктивное сопротивление фазы статора на частоте 50 Гц, Ом; X_{ζ} – приведённое индуктивное сопротивление фазы ротора на частоте 50 Гц, Ом; X_m – индуктивное сопротивление цепи намагничивания на частоте 50 Гц, Ом; \dot{Z}_{C_p} – комплексное ёмкостное сопротивление конденсатора C_p гармоники n , Ом; Kr_{21n} , Kr_{22n} – коэффициенты увеличения сопротивления ротора под влиянием эффекта вытеснения тока от полей прямой и обратной последовательности гармоник; $Kxr_{\text{хнас}21n}$, $Kxr_{\text{хнас}22n}$ – коэффициенты уменьшения индуктивного сопротивления ротора под влиянием эффектов вытеснения тока и насыщения от полей прямой и обратной последовательности гармоник.

Вращающие моменты вычислялись как разность моментов, созданных полями прямой и обратной последовательности соответствующей гармоники:

$$M = m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{21n}^2 R_{\zeta} Kr_{21n}}{W_{cn} s_{1n}} - m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{22n}^2 R_{\zeta} Kr_{22n}}{W_{cn} s_{2n}}, \quad (22)$$

где m – число фаз (в данном случае 3); W_{cn} – синхронная частота вращения гармоники n

Для реализации моделирования необходимо задать множество точек скольжения s через определённый интервал Ds ; Число точек определяется числом i . В зависимости от заданного скольжения определяются комплексные сопротивления в (17) – (20), необходимые для дальнейшего расчёта. При построении характеристик электрических напряжений в зависимости от времени пуска АД необходи-

мо учесть инерционные свойства ВЭМ. Поэтому, учитывая, что по законам классической механики вращающий момент прямо пропорционален произведению углового ускорения механизма на его момент инерции, можно получить уравнение для расчёта промежутков времени за дискретный интервал Δt :

$$t_{i+1} = J \frac{(w_{i+1}^2 - w_i^2)}{M}, \quad (23)$$

где w_i – угловая частота вращения, зависящая от скольжения, рад/с.

Видим, что, используя полученные значения временных интервалов и подставляя токи I_{11} и I_{12} в (8)–(10), можно найти зависимости фазных или линейных напряжений на зажимах АД от времени переходного процесса.

Для оценки адекватности математической модели был проведён эксперимент с одним и двумя двигателями АД80. Параметры машин: $w_1 = 157$ рад/с – синхронная частота вращения поля статора; $L_{s1} = 0,015$ Гн – индуктивность рассеяния фазы статора; $L_{g2} = 0,018$ Гн – приведённая индуктивность рассеяния фазы ротора; $L_m = 0,212$ Гн – индуктивность цепи намагничивания; $p_1 = 2$ – число пар полюсов; $R_1 = 10,2$ Ом; $R_g = 4,558$ Ом; $J = 0,05$ кгж².

Пуск двигателя, как одиночный, так и при одновременно работающей в установившемся режиме второй машине, осуществлялся по схеме рис. 1. При одиночном пуске двигатель подключается к питающему напряжению с помощью контактора КМ1. При этом к двум фазам этой машины с помощью контакторов К1, К2, К3 подключаются конденсаторы C_1, C_2, C_3 , образуя таким образом пусковую ёмкость. После окончания пуска конденсаторы C_2 и C_3 отключаются и двигатель продолжает работать с конденсатором C_1 как рабочей ёмкостью значением 15 мкФ. Значение ёмкости конденсаторов C_2 и C_3 составляет соответственно 15 и 45 мкФ. Следующий ВЭМ пускается с помощью контактора КМ2. При этом снова замыкаются контакторы К2 и К3, подключая к двум фазам пускаемого двигателя конденсаторы C_2 и C_3 . По окончании пуска конденсатор C_3 отключается и машина продолжает работать с ёмкостью C_2 . На рис. 3 приведены диаграммы экспериментальных данных линейных напряжений и фазных токов пускаемого двигателя.

На диаграмме рис. 3 обозначены интервалы: a – одиночный пуск двигателя при пусковой ёмкости 75 мкФ; b – промежуток времени, когда двигатель после пуска ещё работает при ёмкости 75 мкФ, и конденсаторные батареи переключаются на рабочую ёмкость 15 мкФ; v – работа двигателя при рабочей ёмкости 15 мкФ; z – пуск второго двигателя

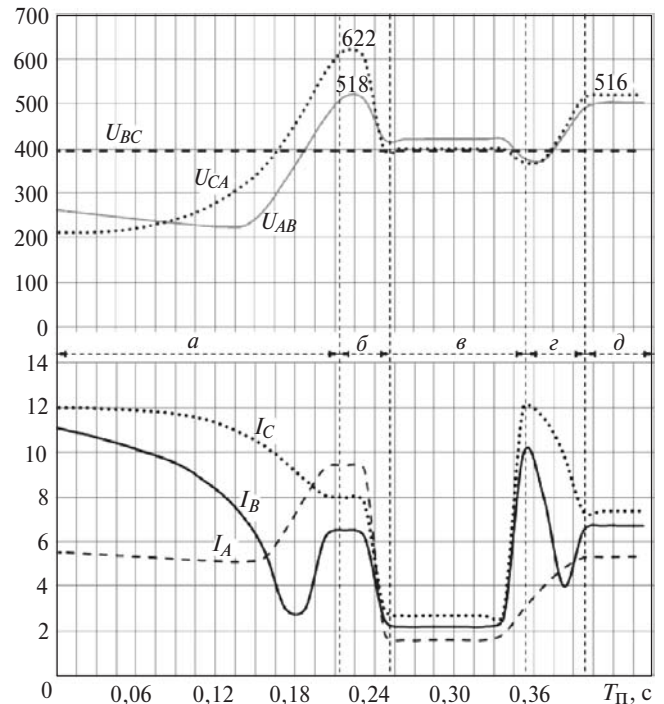


Рис. 3. Диаграмма экспериментальных данных линейных напряжений (В) и фазных токов (А) пускаемого двигателя

при одновременно работающей в установившемся режиме предыдущей машине, ёмкость конденсаторных батарей при этом составляет 75 мкФ; d – промежуток времени, когда двигатель после пуска ещё работает при пусковой ёмкости 75 мкФ, далее питание всех работающих машин отключается.

Для сравнения результатов опыта и моделирования были рассчитаны характеристики напряжений и токов двигателя в процессе пуска. Моделирование этих режимов осуществлялось при тех же заданных условиях, что и в эксперименте.

Сравнение характеристик показало, что погрешность между опытными и расчётными данными в отдельных точках не превышает 7%.

С использованием математической модели были исследованы пусковые режимы вспомогательных машин НВА-55, работающих по схеме рис. 1. Исходные параметры двигателя: $w_1 = 157$ рад/с; $L_{s1} = 0,000376$ Гн; $L_{g2} = 0,000372$ Гн; $L_m = 0,0098$ Гн; $p_1 = 2$; $R_1 = 0,047$ Ом; $R_g = 0,0893$ Ом. Моделирование проводилось с учётом того, что однофазное напряжение питания могло составить 470 В. Ёмкость каждого конденсатора C_1, C_2, C_3 равна 726 мкФ. Полученные авторами диаграммы линейных напряжений ВЭМ в зависимости от времени пуска показали: перенапряжение при одиночном пуске ВЭМ может достигать 710 В, что превышает номинальное напряжение питания двигателя 380 В почти в два раза. При пуске двигателя одновременно с работающим в установившемся режиме ВЭМ перенапряжение составляет до 510 В.

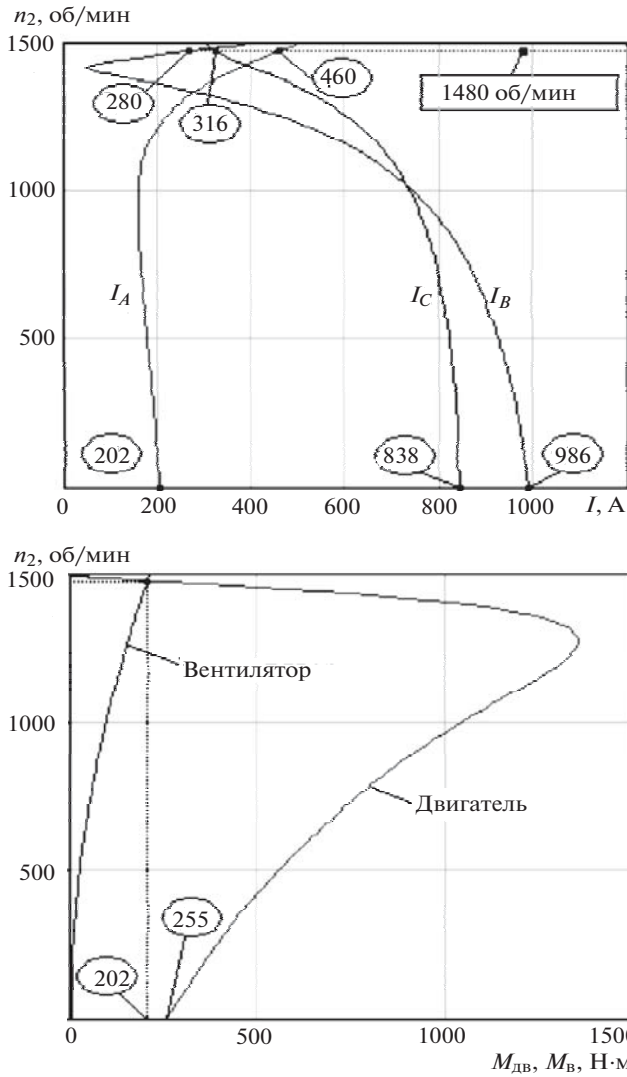


Рис. 4. Механические и токовые характеристики двигателя НВА-55 при одиночном пуске

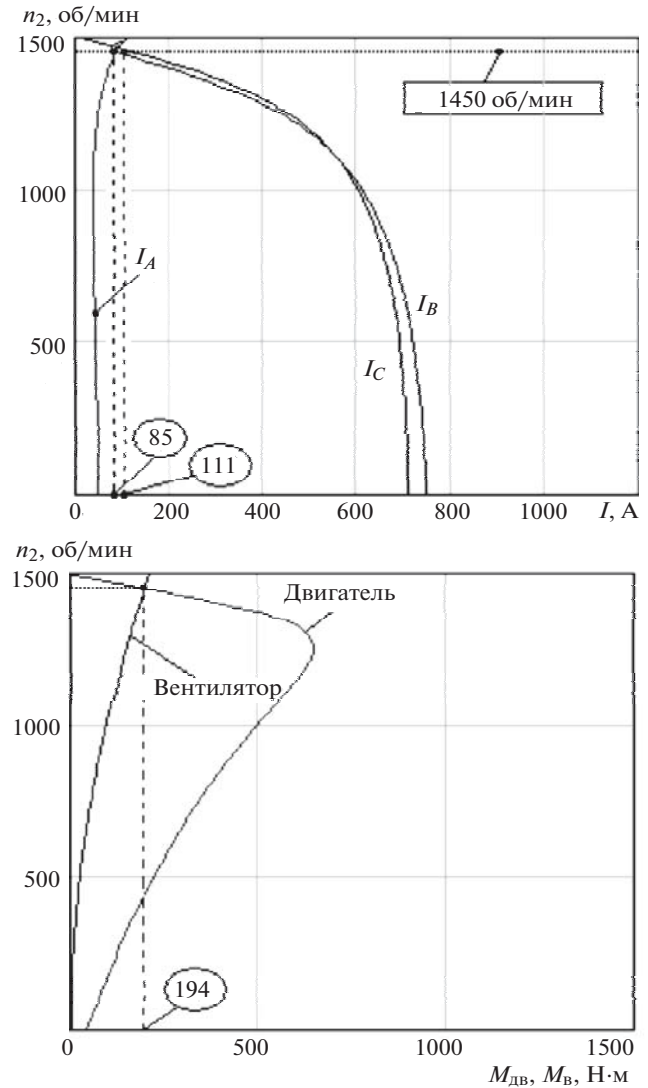


Рис. 5. Механические и токовые характеристики двигателя НВА-55 в номинальном режиме работы

На рис. 4 представлены механические и токовые характеристики двигателя НВА-55 при одиночном пуске, напряжении питания 470 В и пусковой емкости 2178 мкВ. Пусковые токи фаз не превышают допустимого значения 1105 А по ТУ для НВА-55. В режиме одиночного пуска асинхронного вспомогательного двигателя также возникает некоторое увеличение фазных токов двигателя в конце разгона машины. При питании напряжением 470 В значение этих токов наиболее велико, что вызвано явлением резонанса напряжений, когда на подходе к установившемуся режиму входное комплексное сопротивление фазы машины Z_1 приближается по значению к емкостному комплексному сопротивлению конденсаторной батареи C_p (рис. 1); эти сопротивления начинают частично компенсировать друг друга. По окончании пуска, когда пусковая ёмкость отключена, сопротивление C_p значительно больше Z_1 при любых частотах вращения ротора и при любом значении напряжения питания. Поэтому в но-

минальном длительном режиме вспомогательной асинхронной машины эффект резонанса почти не проявляется, а рабочие токи составляют 85 А в одной фазе и 111 А в двух других фазах (рис. 5).

При пуске двигателя НВА-55 с одновременно работающим ВЭМ в длительном установившемся режиме при однофазном напряжении питания 470 В пусковые токи не превышают допустимого по ТУ значения 1105 А.

Выводы. 1. Одиночный и групповой пуски трехфазных двигателей при однофазном питании с общей симметрирующей конденсаторной батареей приводят к сильным броскам линейного напряжения, которые превышают номинальное значение напряжения питания 380 В. Такие перенапряжения способствуют ускоренному старению изоляции статора.

2. С учетом особенностей работы НВА-55 целесообразно разработать следующие мероприятия по улучшению условий работы ВЭМ:

применить утолщённую изоляцию обмотки статора для повышения её устойчивости к электрическим перенапряжениям при одиночном пуске ВЭМ;

усовершенствовать схему питания ВЭМ таким образом, чтобы обеспечить своевременное переключение конденсаторных батарей с пусковой ёмкости на рабочую для предотвращения высоких перенапряжений в конце разгона двигателей во время пуска.

принять меры по модернизации конструкции ВЭМ с целью повышения его устойчивости к тяжёлым динамическим режимам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кононенко Е.В., Кононенко К.Е., Кружков В.Г.** Анализ работы асинхронных двигателей при несимметрии первичного напряжения. — Изв. вузов. Электромеханика, 2000, №3.
2. **Качан Ю.Г.** Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания. — Вестник КДПУ им. Михаила Остроградского, 2009, №3.
3. **Анализ** технического состояния электровозного парка по сети железных дорог России за 2008 г. — М.: ИПЦ «Желдориздат», 2009.
4. **Лопухина Е.М., Сомихина Г.С.** Расчет асинхронных электродвигателей однофазного и трехфазного тока. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961.
5. **Курбасов А.С.** Повышение работоспособности тяговых электрических машин. — М.: Транспорт, 1976.

[16.12.10]

Авторы: Гирник Андрей Сергеевич — аспирант кафедры электромеханических комплексов и материалов (ЭМКМ) Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Рапопорт Олег Лазаревич — зав. кафедрой ЭМКМ Национального исследовательского Томского политехнического университета