

УДК 621.313.33-83-519

МЕТОДЫ РАСЧЕТА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АНОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И НАГРУЗКАХ

АБДУЛРАХМАНОВ К.А.

Азербайджанская Государственная Морская Академия

В статье обобщаются результаты работ, посвященных методам расчета установившихся и переходных режимов асинхронного электропривода дистанционного управления, работающего при детерминированных аномальных напряжениях и нагрузках.

Вследствие широкого применения в последние годы тиристорных преобразователей и наличия мощных однофазных нелинейных потребителей электроэнергии, напряжения электрических сетей являются несимметричными и несинусоидальными; имеют место отклонения напряжений от номинальных значений.

В существующей литературе влияние несимметрии, несинусоидальности и отклонений напряжений сети на характеристики асинхронного электропривода в установившемся режиме рассмотрено для случая, когда двигатель подключен к сети непосредственно, прямая составляющая несимметричных напряжений и нагрузка на валу равны, соответственно, номинальному напряжению и номинальной мощности электродвигателя; аналитический метод расчета переходных процессов при несимметричных несинусоидальных напряжениях отсутствует вообще.

Питание двигателя АЭДУ от трехфазной сети осуществляется по схемам двух- или однократной трансформации.

Чаще всего применяется схема однократной трансформации напряжения.

На рис.1 приводятся схемы замещения АЭДУ при питании по схеме однократной трансформации для симметричных синусоидальных напряжений (рис.1, а),

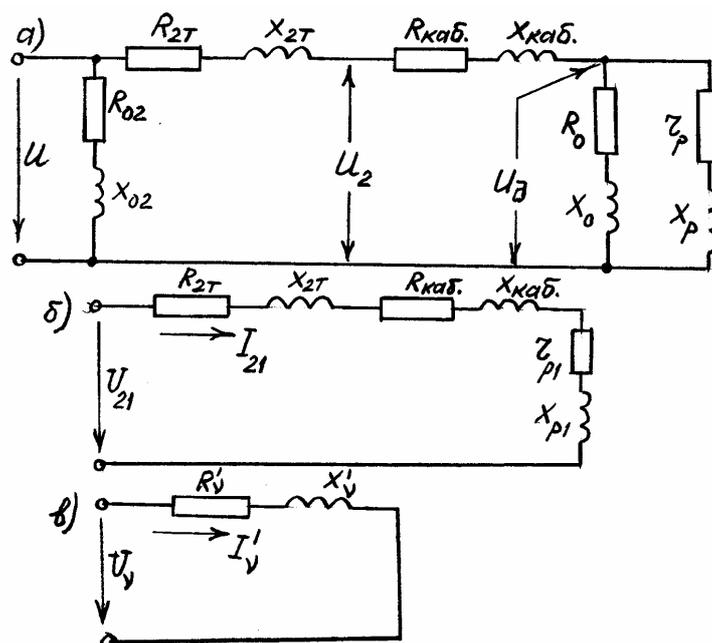


Рис.1.

а также для составляющей обратной последовательности несимметричных напряжений (рис. 1, б) и высших гармоник несинусоидальных напряжений (рис.1, в). Для составляющей обратной последовательности первой гармоники токов и для высших гармоник токов, двигатель находится в режиме короткого замыкания. Полное активное и индуктивное сопротивления силовой цепи АЭДУ для v -той гармоники тока определяется по выражениям:

$$R'_v = r'_{кв\delta} \cdot d_5; \quad x'_v = x'_{кв\delta} \cdot d_6 \quad (1)$$

здесь $r'_{кв\delta}, x'_{кв\delta}$ - сопротивления двигателей для v -той гармоники тока; d_5, d_6 - коэффициенты, характеризующие степень увеличения сопротивлений, из-за наличия в цепи статора сопротивлений кабеля-токопровода и трансформатора:

$$d_5 = 1 + \frac{r_{k(2\tau)} + k_{t2}^2 \cdot R_{каб.1}}{(k_3 \cdot k_{\tau 2})^2 \cdot r_{k1}}; \quad d_6 = 1 + \frac{x_{k(2\tau)} + k_{t2}^2 \cdot x_{каб.1}}{(k_3 \cdot k_{\tau 2})^2 \cdot x_{k1}}$$

$R_{каб.1}, x_{каб.1}$ - сопротивления токопровода для первой гармоники токов;
 $r_{k(2\tau)}, x_{k(2\tau)}$ - сопротивления короткого замыкания трансформатора; r_{k1}, x_{k1} - сопротивления короткого замыкания двигателя. Параметры АЭДУ для токов обратной последовательности токов определяются также по (1), при $v = 1$.

Зависимости сопротивлений от порядка высшей гармоники, рассчитанные по (1) для двигателя АЭДУ мощностью 28 кВт, работающего на расстоянии 1500 м, приводятся на рис. 2, где кривые 1 и 2 – зависимости активного и индуктивного сопротивлений собственно двигателя, кривые 3 и 4 – то же, силовой цепи АЭДУ.

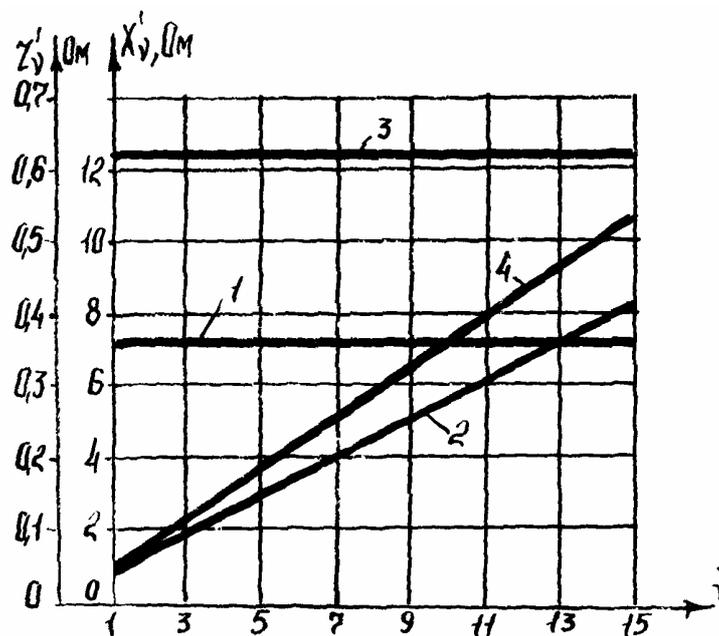


Рис.2.

Наличие длинного токопровода и трансформатора в силовой цепи АЭДУ, особенно увеличивает его сопротивления для составляющей обратной последовательности первой гармоники и для высших гармоник несимметричных несинусоидальных токов. Параметры, определяемые по (1), могут быть положены в основу расчетов АЭДУ при несимметричных несинусоидальных режимах.

Составляющая прямой последовательности несимметричных напряжений обычно отличается от номинального напряжения двигателя. Для расчета относительных превышений потерь в обмотках статора Δ_1 , ротора Δ_2 и полных потерь Δ в двигателе, в данном режиме, получены математические модели в виде:

$$\Delta_1 = \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_{1н}} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad \Delta_2 = \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_{2н}} - 1 \right) \cdot 100\%;$$

$$\Delta = \left(\frac{\Delta P_1 / \Delta P_{1н} + \Delta P_2 / \Delta P_{2н} \cdot \gamma^2 \cdot r_2' / r_1}{1 + \gamma^2 \cdot r_2' / r_1} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_{1н}} = I_{11}^{*2} + (\varepsilon \delta k)^2; \quad \frac{\Delta P_2}{\Delta P_{2н}} = \frac{1}{\delta^2} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon \delta \cdot \kappa}{\gamma} \right)^2,$$

здесь ε - коэффициент несимметрии напряжений; δ - относительное значение составляющей прямой последовательности напряжений.

Зависимости относительных превышений потерь в двигателе А42-4 (2,8 кВт) в функции коэффициентов ε и δ , рассчитанные по выражениям (2), приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Превышения потерь	ε	δ				
		1	0,95	0,90	0,85	0,80
$\Delta_1, \%$ $\Delta_2, \%$	0	0	$\frac{8}{14}$	$\frac{12}{24}$	$\frac{21}{38}$	$\frac{32}{55}$
	0,03	$\frac{1,5}{1,6}$	$\frac{9,3}{15,4}$	$\frac{13,2}{25,3}$	$\frac{22,1}{39,2}$	$\frac{33}{56}$
	0,06	$\frac{6}{6,7}$	$\frac{13,5}{20,1}$	$\frac{17,0}{29,5}$	$\frac{25,5}{43}$	$\frac{36}{59,4}$
	0,09	$\frac{13,5}{14,4}$	$\frac{19,7}{26,6}$	$\frac{22,8}{35,7}$	$\frac{31}{48,8}$	$\frac{41}{65}$
	0,12					
$\Delta, \%$	0	0	10,5	17,5	28,5	42
	0,03	1,5	12	18,5	29,5	43
	0,06	6	16	22,5	33	46
	0,09	14	23	28,5	39	51
	0,12	25	32	37	46,5	58

По данным таблицы следует, что при отличных от номинального значениях составляющей прямой последовательности напряжений, потери в обмотках двигателя сильно повышаются.

Обычно нагрузка на валу асинхронного электропривода также отличается от номинальной. С уменьшением нагрузки на валу, прямая составляющая токов уменьшается. Вследствие этого, относительные превышения потерь в обмотках двигателя, вызванные несимметрией напряжений, возрастают.

Расчеты относительных превышений потерь в обмотках двигателя при несимметрии напряжений и нагрузках на валу, отличных от номинальной, могут быть проведены по следующим моделям:

$$\Delta_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta P'_2} - 1 = \left(\frac{I_{12}}{I_{11}}\right)^2; \quad \Delta_2 = \frac{\Delta P_2}{\Delta P'_2} - 1 = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{I'_{22}}{I'_{21}}\right)^2; \quad (3)$$

$$\frac{I_{12}}{I_{11}} = \frac{\varepsilon k}{I_{11}^*}; \quad \frac{I'_{22}}{I'_{21}} = \frac{\varepsilon k}{-I_0^* \cdot \cos \alpha + \sqrt{(I_0^* \cdot \cos \alpha)^2 + I_{11}^{*2} - I_0^{*2}}}$$

$$I_{11}^* = \sqrt{I_0^{*2} + (1 - I_0^{*2}) \cdot \frac{2k_3}{n_0^* + \sqrt{n_0^{*2} - 2k_3 \cdot (n_0^* - 1)}}$$

здесь I_{11}, I_{12} – составляющие прямой и обратной последовательности токов статора; I_{21}, I_{22} – то же, токов ротора, n_0^* – отношение скорости идеального холостого хода к номинальной; I_0^* – отношение тока холостого хода к номинальному току.

В таблице 2 приводятся относительные превышения потерь в обмотках статора Δ_1 и ротора Δ_2 двигателя А42-4 в функции коэффициентов загрузки K_3 и несимметрии напряжений ε .

Таблица 2

Относительные превышения потерь	K_3					ε
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
Δ_1	0,069	0,049	0,032	0,021	0,015	0,03
Δ_2	0,7	0,28	0,12	0,065	0,04	
	0,278	0,194	0,128	0,085	0,069	0,06
	6,8	1,12	0,48	0,26	0,16	

По данным таблицы следует, что наибольшие изменения относительных превышений потерь, для заданной несимметрии напряжений, имеют место в обмотке ротора.

Ввиду наличия предвключенных сопротивлений в цепи статора, АЭДУ наиболее чувствительны к отклонениям напряжений в электрической сети. Исходя из установленной зависимости между скольжением и напряжением и пользуясь схемой замещения, получены модели относительных отклонений потерь, КПД и коэффициента мощности АЭДУ в функции отклонений напряжений.

Установлено, что снижение напряжения всего лишь на 8% приводит к снижению мощности двигателя на 18%. Это подтверждает необходимость автоматического регулирования напряжения непосредственно на зажимах двигателя, которое отсутствует в существующих системах АЭДУ.

Для повышения коэффициента мощности, а также облегчения пуска АЭДУ, параллельно к зажимам двигателя подключается конденсатор. Исходя из схем замещения и векторной диаграммы, получены модели реактивных мощностей фаз двигателя, при несимметрии напряжений сети; установлено, что при несимметрии напряжений, одна из фаз генерирует реактивную мощность в электрическую сеть, а две другие фазы испытывают недостаток в реактивной мощности; коэффициент несимметрии токов фаз при этом увеличивается.

Исходя из условия равенства среднеквадратичного тока двигателя, при несимметрии и несинусоидальности напряжений, допустимому току по нагреву, получены модели допустимых значений спектра высших гармоник несимметричных несинусоидальных напряжений; допустимого коэффициента несимметрии $\varepsilon_{\text{дон}}$ синусоидальных напряжений; допустимого значения коэффициента несимметрии $\varepsilon_{1\text{дон}}$ по первой гармонике, при несимметричных несинусоидальных напряжениях; допустимого спектра высших гармоник, при симметричных по первой гармонике несинусоидальных напряжениях:

$$\left[\sum_{n=1}^m \frac{1}{v\sqrt{v}} \cdot (1 + \varepsilon_v^2) \cdot U_{1v}^{*2} \right]_{\text{дон}} = \frac{2a}{K_n^2} - \varepsilon_1^2; \quad \varepsilon_{\text{дон}} = \frac{\sqrt{2a}}{K_n}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{1\text{дон}} = \sqrt{\frac{2a}{K_n^2} - \sum_{n=1}^m \frac{1}{v\sqrt{v}} \cdot (1 + \varepsilon_v^2) \cdot U_{1v}^{*2}}; \quad \left[\sum_{n=1}^m \frac{1}{v\sqrt{v}} \cdot (1 + \varepsilon_v^2) \cdot U_{1v}^{*2} \right]_{\text{дон}} = \frac{2a}{K_n^2}$$

здесь ε_v - коэффициент несимметрии v -той гармоники напряжений; $v = 6n \pm 1 (n = 0, 1, 2, \dots)$; a -допустимая перегрузка; U_{1v} - составляющая прямой последовательности v -той гармоники напряжений.

На рис.3 и 4 приводятся зависимости допустимого значения пятой гармоники напряжений и допустимого коэффициента несимметрии напряжений от допустимой перегрузки двигателя, при $K_n = 4$ (кривая 1), $K_n = 5$ (кривая 2), $K_n = 6$ (кривая 3), где K_n - отношение сопротивлений для токов прямой и обратной последовательности.

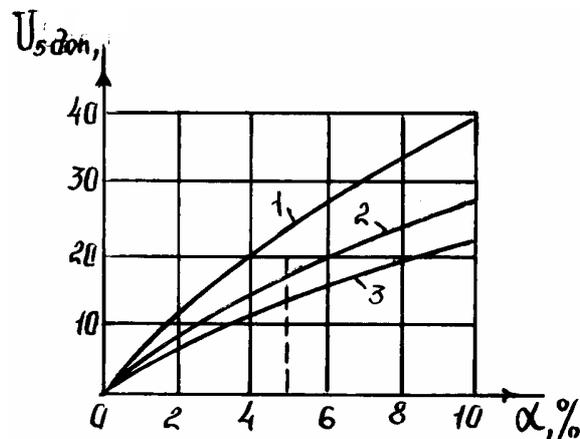


Рис.3

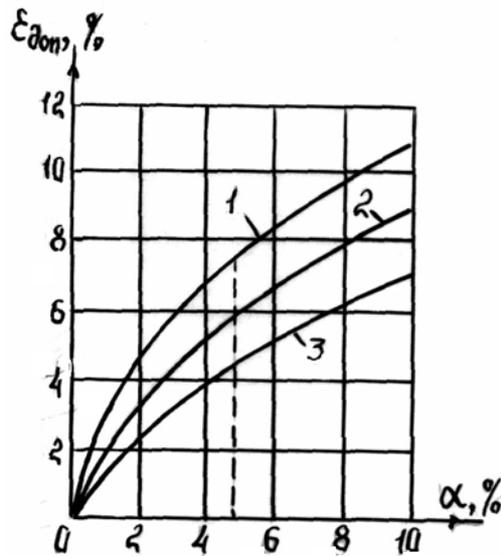


Рис.4

Для ограничения уровня высших гармоник токов разработано устройство, которое состоит из трансформатора, первичная обмотка которого включается последовательно с нагрузкой на напряжение сети, а вторичная обмотка подключается на зажимы цепи, составленной из последовательно включенных индуктивности и конденсатора [1]. Устройство позволяет ограничить величины высших гармоник токов в 4-5 раза [2].

Для оценки динамического и термического действия переходных токов на элементы АЭДУ, необходимо производить расчеты электромагнитных переходных процессов, которые могут быть проведены как на ПК, так и аналитически.

Аналитический расчет переходных процессов позволяет получить переходные составляющие токов в явной форме, оценить влияние параметров системы на их частоты и коэффициенты затухания. Исходя из уравнений двигателя, записанных в осях α, β для несимметричной ν -той гармоники напряжений, для ν -той гармоники тока статора получено выражение [3]:

$$i_{1\nu\alpha} = I_{1\nu\alpha} \cdot \cos(\omega_\nu t + \gamma_\nu + \varphi_{1\nu}) + I'_{1\nu\alpha} \cdot \cos(\beta_{2\nu} t + \gamma_\nu + \varphi_{2\nu}) + I''_{1\nu\alpha} \cdot \cos(\beta_{3\nu} t + \gamma_\nu + \varphi_{3\nu}), \quad (5)$$

здесь $I_{1\nu\alpha}, I'_{1\nu\alpha}, I''_{1\nu\alpha}$ - установившиеся и переходные составляющие ν -той гармоники тока статора; y_ν, y'_ν, y''_ν - проводимости двигателя для установившейся и переходных составляющих ν -той гармоники тока.

Анализ моделей коэффициентов затухания и частот переходных составляющих токов показывает, что одни составляющие ν -той гармоники переходных токов затухают быстрее, а другие – медленнее, чем составляющие первой гармоники токов; частоты переходных составляющих высших гармоник токов уменьшаются с ростом скольжения; между частотами переходных составляющих ν -той гармоники токов отсутствует прямая пропорциональность, существующая между частотами установившихся составляющих этих токов.

Для мгновенных значений ЭДС, индуцированных в обмотке статора двигателя остаточными полями ротора, при его повторном включении в сеть с несимметричными несинусоидальными напряжениями, получены модели в виде:

$$e_{ov_1}^* = E_{ovm1}^* \cdot e^{j(\omega_s t_0 + \gamma_v + \varphi_{1v})} \cdot e^{-j(\omega_s a_{rv} - j\omega)\tau}; \quad (6)$$

$$e_{ov_2}^* = E_{ovm2}^* \cdot e^{j(\omega_s t_0 + \gamma_v + \varphi_{2v})} \cdot e^{-j(\omega_s a_{rv} - j\omega)\tau};$$

здесь E_{ovm1}^* , E_{ovm2}^* - относительные значения амплитуд ЭДС, индуцированных прямо вращающейся и обратно вращающейся составляющими остаточного поля ротора.

Результаты расчетов и экспериментов показывают, что полученные модели обеспечивают достаточную надежность; с ростом порядка гармонической и скольжения двигателя величины ЭДС, индуцируемые остаточными полями, снижаются.

Рабочим механизмом на валу большинства АЭДУ является центробежный насос. Встречается аномальный режим, когда насос, рассчитанный для работы при наличии большого противодавления, запускается при его отсутствии; причем противодавление растет в переходном процессе пуска, по мере заполнения трубопровода жидкостью. Расчет мощности АЭДУ в данном режиме, представляет теоретический и практический интерес [4].

Сущность предложенного метода расчета мощности двигателя в данном режиме заключается в следующем. Считается, что после включения в сеть, электропривод разгоняется по естественной механической характеристике до «начальной» точки, где вращающий момент двигателя уравнивается с моментом сопротивления, соответствующим статистическому напору $H_{стн}=0$. Этот период составляет 0,12-0,6 сек. и за это время заканчиваются основные электромеханические переходные процессы в электроприводе. Далее происходит заполнение трубопровода жидкостью, постепенный рост статистического напора и уменьшение момента сопротивления на валу. Электропривод работает в квазиустановившемся режиме. Его скорость медленно растет, приближаясь к скорости установившегося режима работы. Период разгона электропривода от «начальной» точки до точки установившегося режима разбивается на малые интервалы с длительностью Δt . В пределах каждого интервала времени скорость двигателя, противодавление и подачи насоса считаются постоянными. При расчете напора, подачи насоса, скорости, момента, и мощности двигателя на i -м интервале, в качестве исходных принимаются их значения в конце $(i-1)$ -го интервала времени. На рис.5 приводится зависимость превышения мощности при пуске АЭДУ установки ЭЦН, эксплуатируемого на одной из скважин НГДУ ГНК АР, построенная по результатам расчетов по предложенному методу.

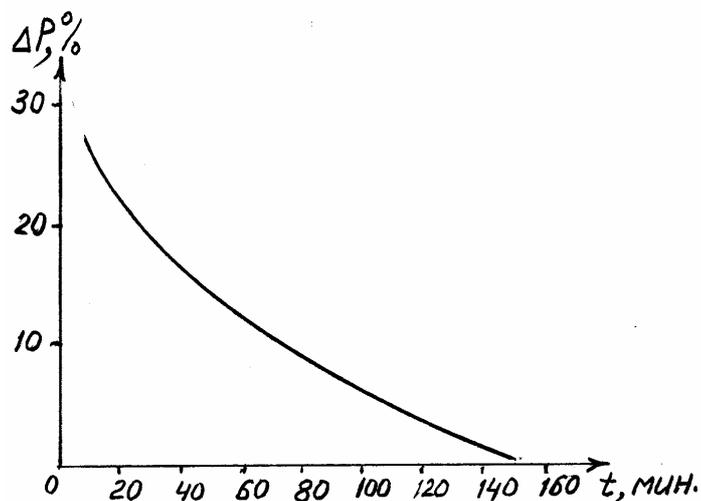


Рис.5.

В аномальном процессе пуска имеет место перегрузка АЭДУ по мощности, которая может быть предотвращена либо выбором двигателя повышенной мощности, что нежелательно, либо регулированием тока статора в замкнутой системе непрерывного управления [5].

-
1. *Абдулрахманов К. А.* А.С. 623249, СССР // Б. И. 1978, №33, с.50
 2. *Абдулрахманов К. А.* // Труды ЭНИИ, М. – 1990, -с.26-31
 3. *Абдулрахманов К. А.* // Сб. «Повышение эффективности и надежности электромеханических и электротермических устройств», изд. АзиНефтехим. – 1985, - с.3-7.
 4. *Абдулрахманов К. А.* // Ученые записки АзГНА. – 1995, - №1, - с.82-86
 5. *Абдулрахманов К. А.* // Тез. докл. н-т. конф. «Энергетика Азербайджана в условиях экономических реформ», Баку 1995, с.114-115

DETERMINİK ANORMAL GƏRGİNLİKLƏRDƏ VƏ YÜKLƏRDƏ MƏSAFƏDƏN İDARƏ OLUNAN ASİNXRON ELEKTRİK İNTİQALININ HESABLANMASI ÜSULLARI

ƏBDÜLRƏHMANOV Q. A.

Məqalədə, determinik anormal gərginliklərdə və yüklərdə işləyən, məsafədən idarə olunan asinxron elektrik intiqalının qərarlaşmış və keçid rejimlərinin hesablanmasına həsr olunmuş işlərin nəticələri ümumiləşdirilir.

METHODS OF CALCULATION OF DISTANCE CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRICAL DRIVE WITH DETERMINED ABNORMAL VOLTAGES AND LOADS

ABDULRAHMANOV K. A.

In the paper the results of research, devoted to calculation methods of transients and steady-states of distance-controlled asynchronous electrical drive operating with determined abnormal voltages and loads, are generalized.